



Leçon inaugurale - 19 février 2026

Yvon MADAY

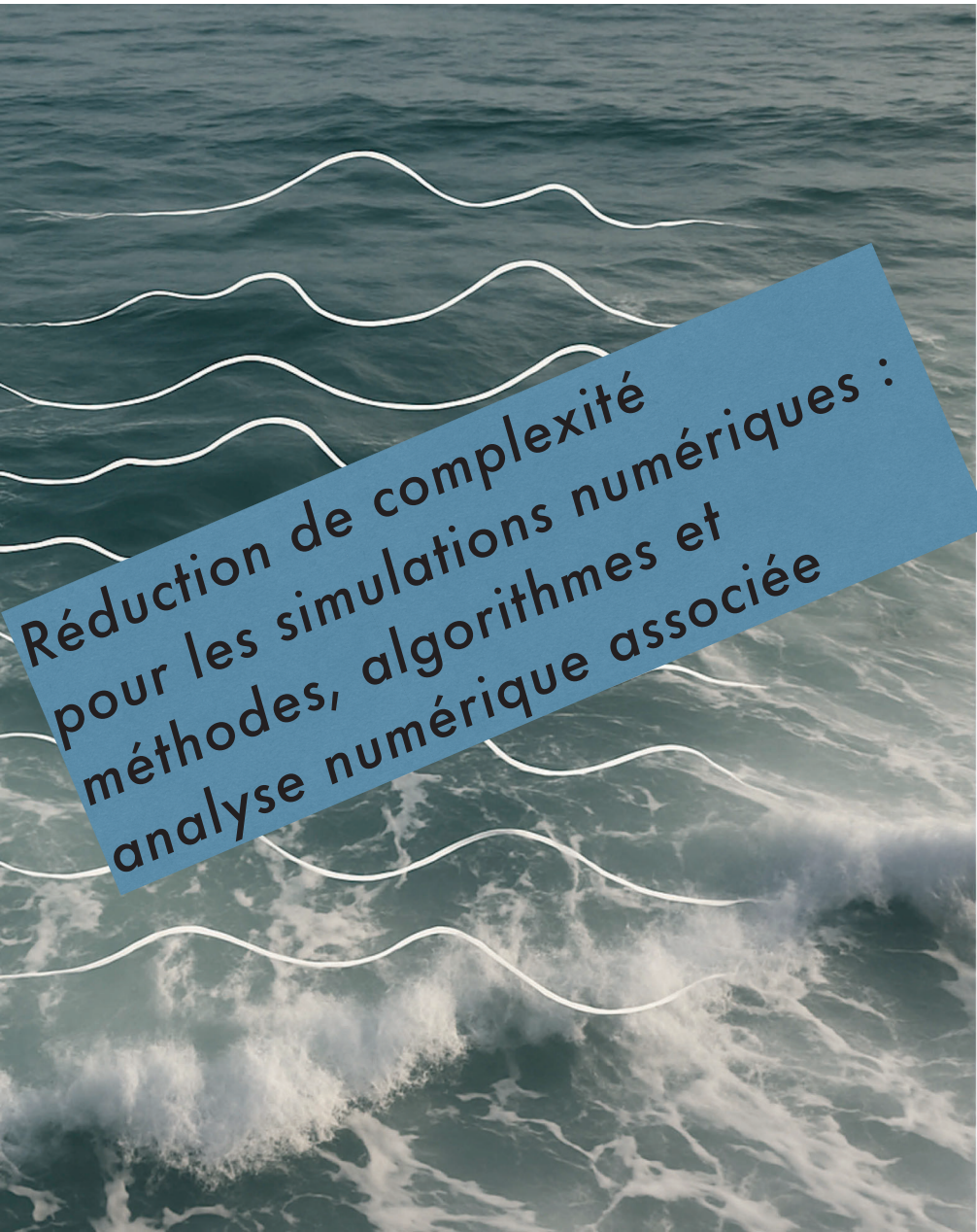
*Réduire la complexité
pour maîtriser la résolution
des modèles mathématiques*

CHAIRE ANNUELLE INFORMATIQUE
ET SCIENCES NUMÉRIQUES

En partenariat avec Inria

Inria

COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —



Réduction de complexité
pour les simulations numériques :
méthodes, algorithmes et
analyse numérique associée

Tous les mardi à partir de la semaine prochaine

Yvon MADAY

*Réduire la complexité
pour maîtriser la résolution
des modèles mathématiques*

CHAIRE ANNUELLE INFORMATIQUE
ET SCIENCES NUMÉRIQUES

En partenariat avec Inria

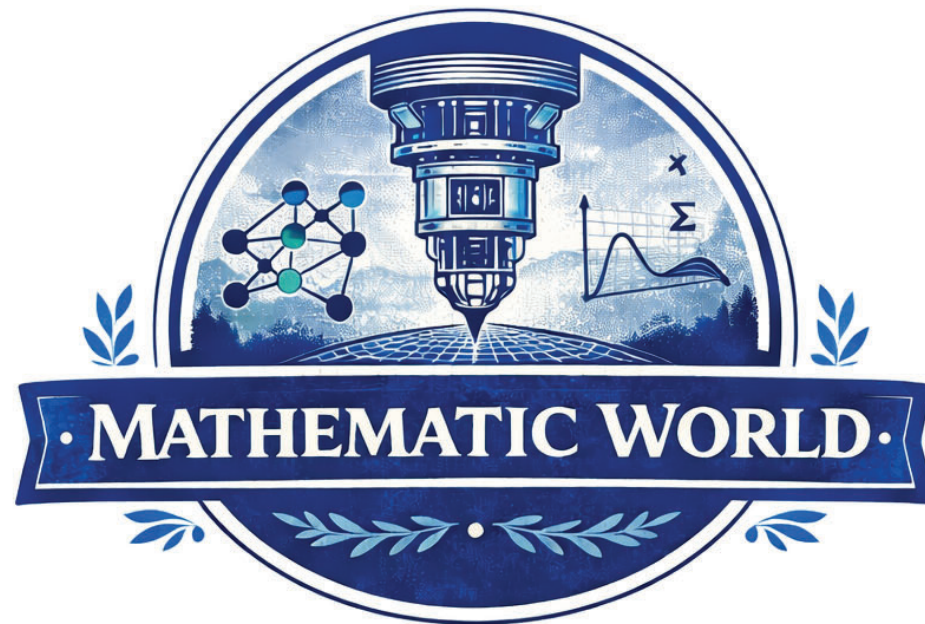
Inria

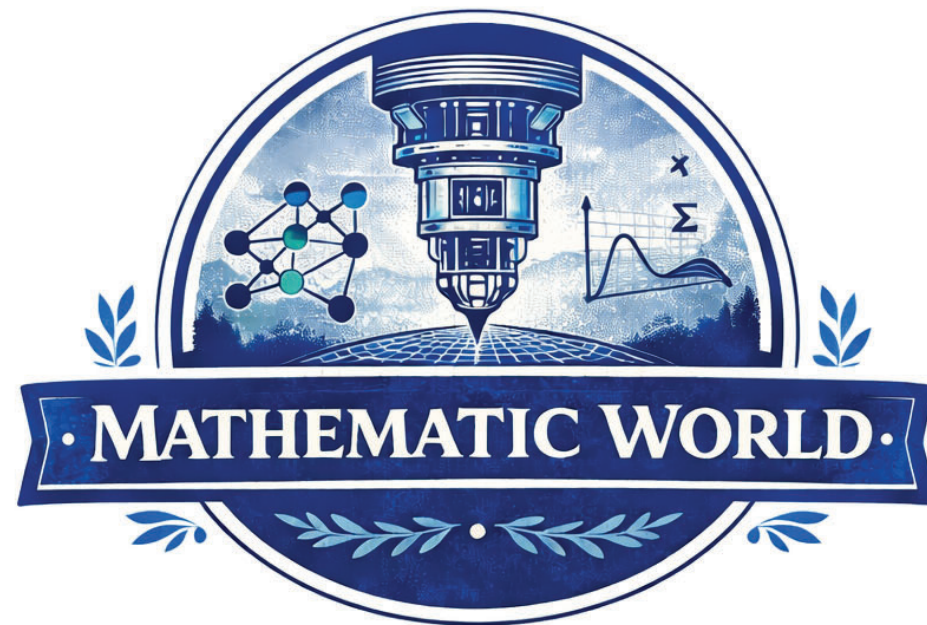
COLLÈGE
DE FRANCE

— 1530 —



Mais y a-t-il encore des choses à découvrir en mathématiques ?





Un monde de données

mécanique

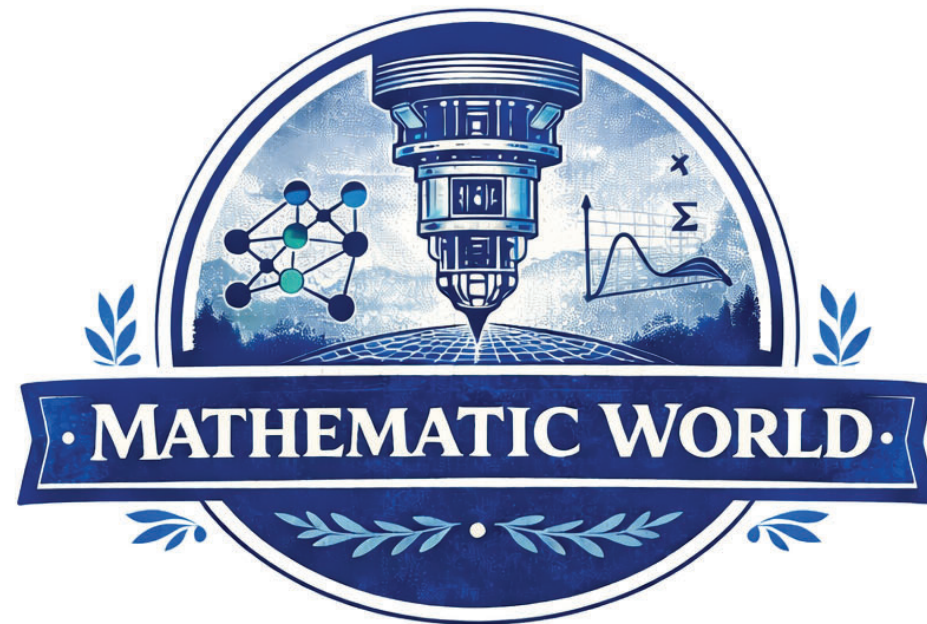
médecine

physique

biologie

chimie

SHS



Un monde de données

mécanique

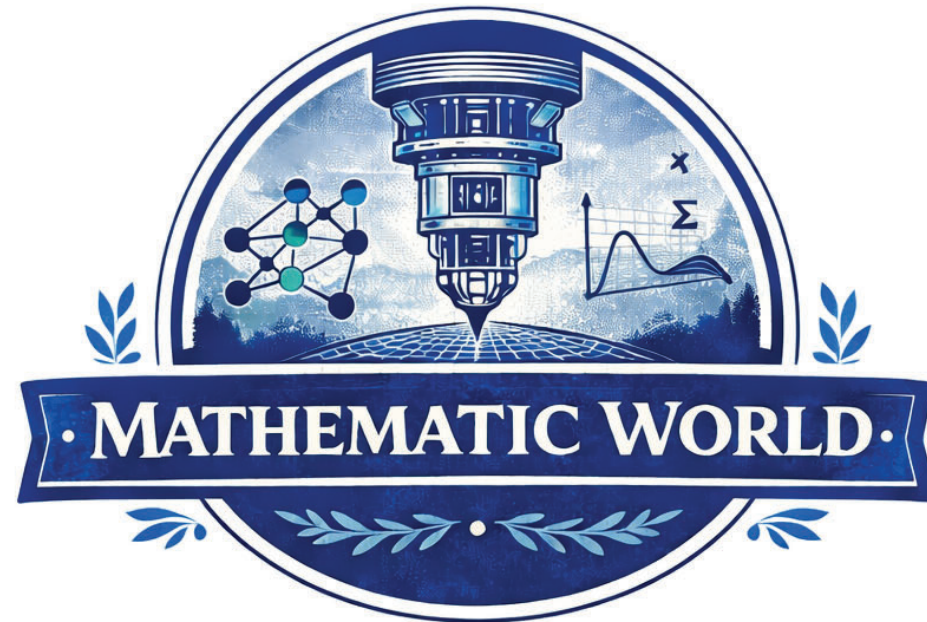
médecine

physique

biologie

chimie

SHS



Un monde de données

température

vitesse

pression

intensité

tension

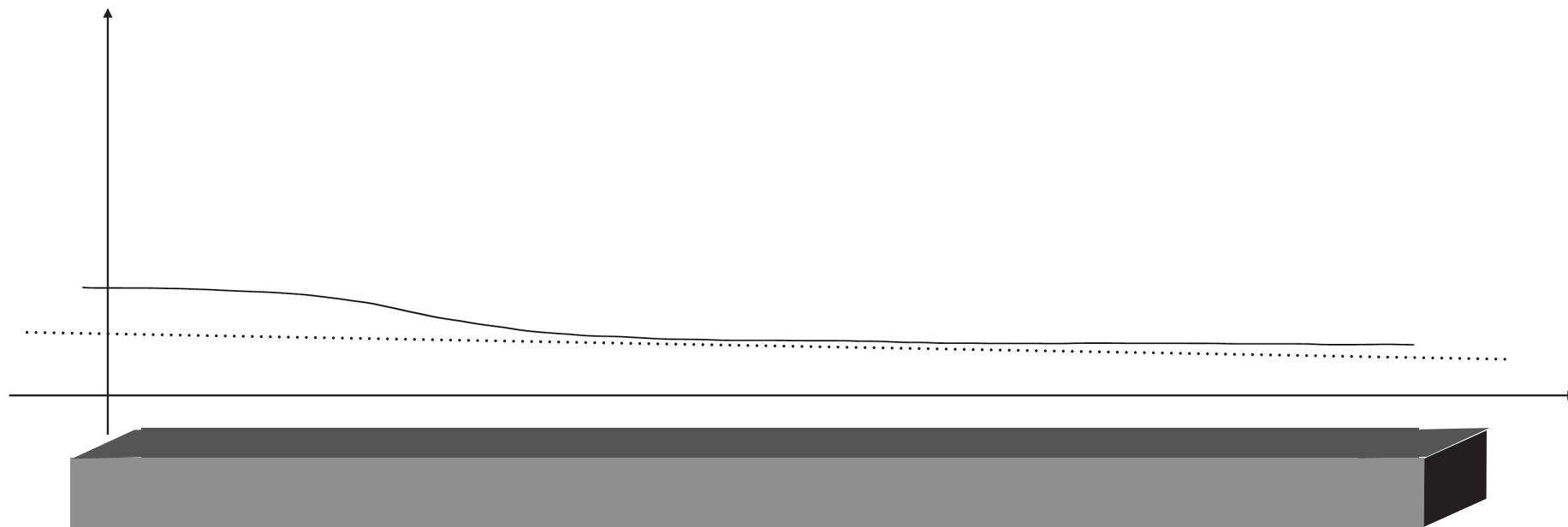
affinités de liaison

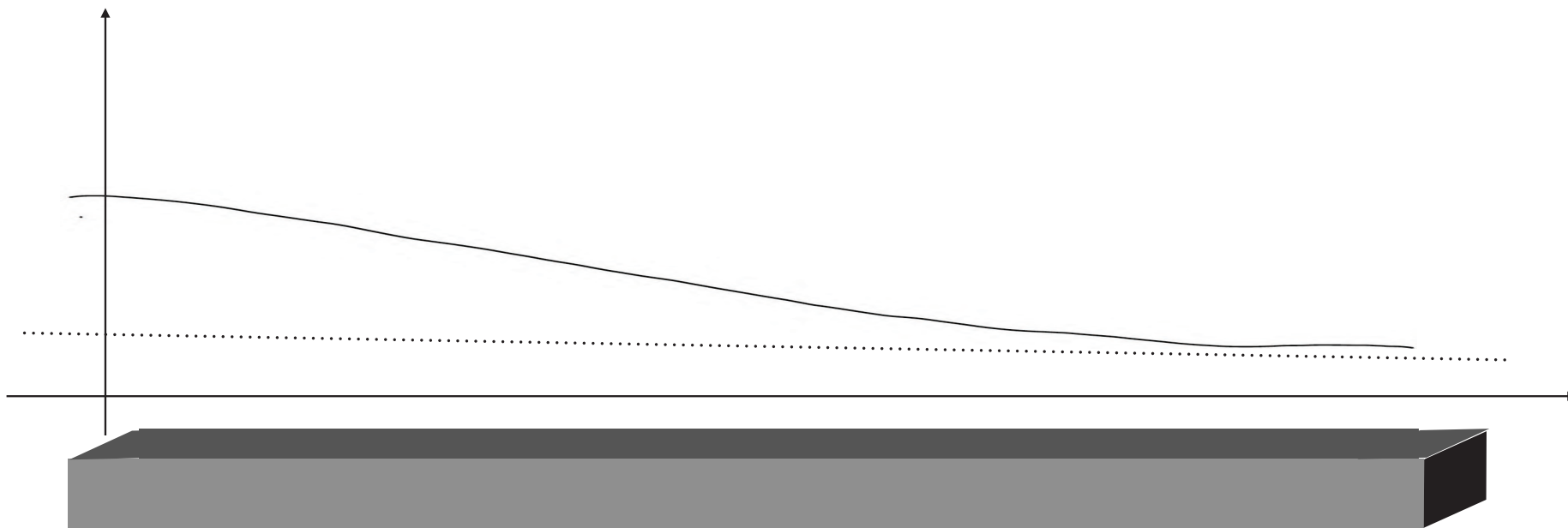
indices de solvation

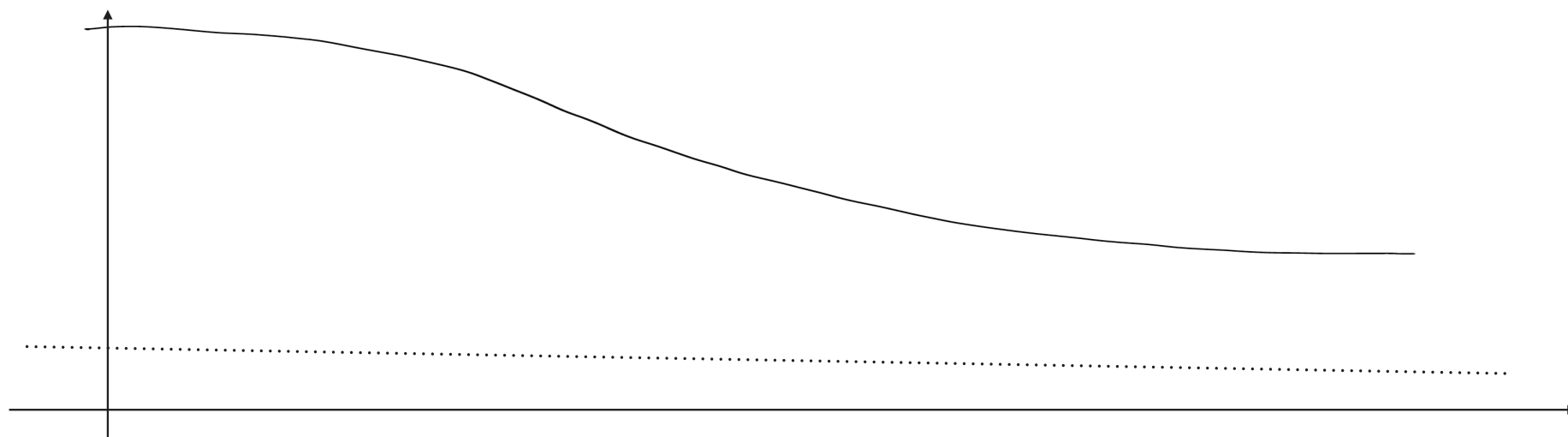
modules de Young



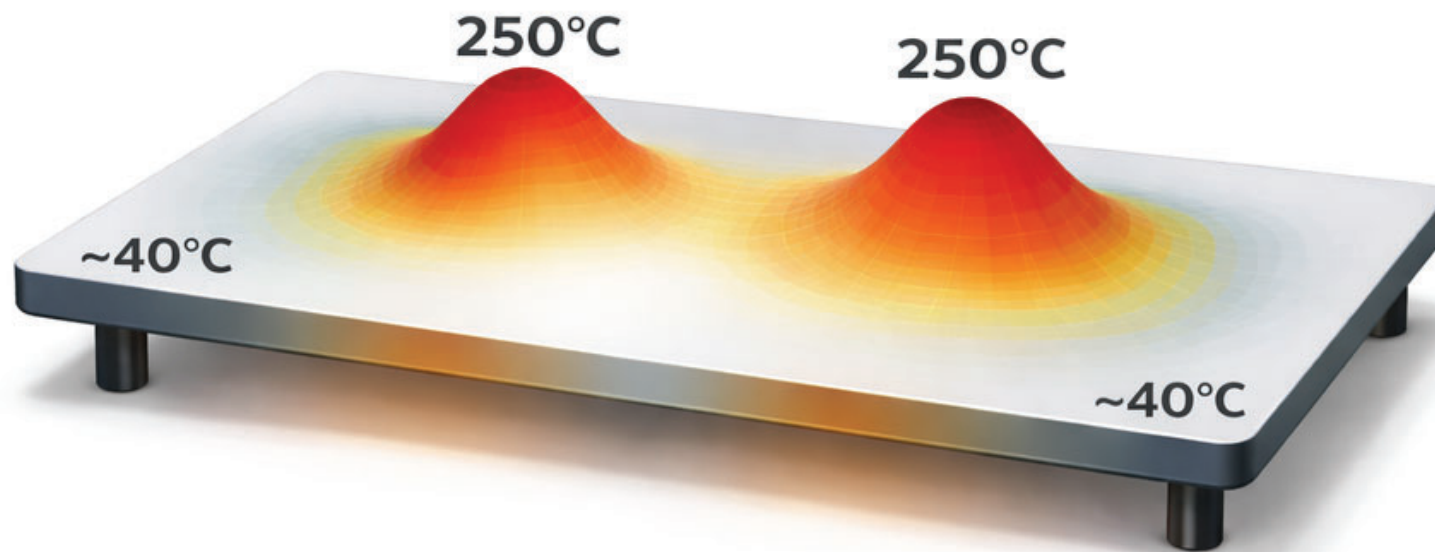




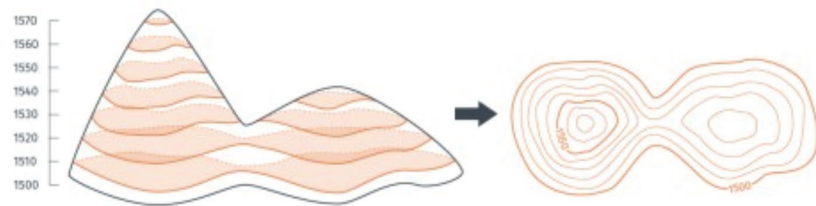


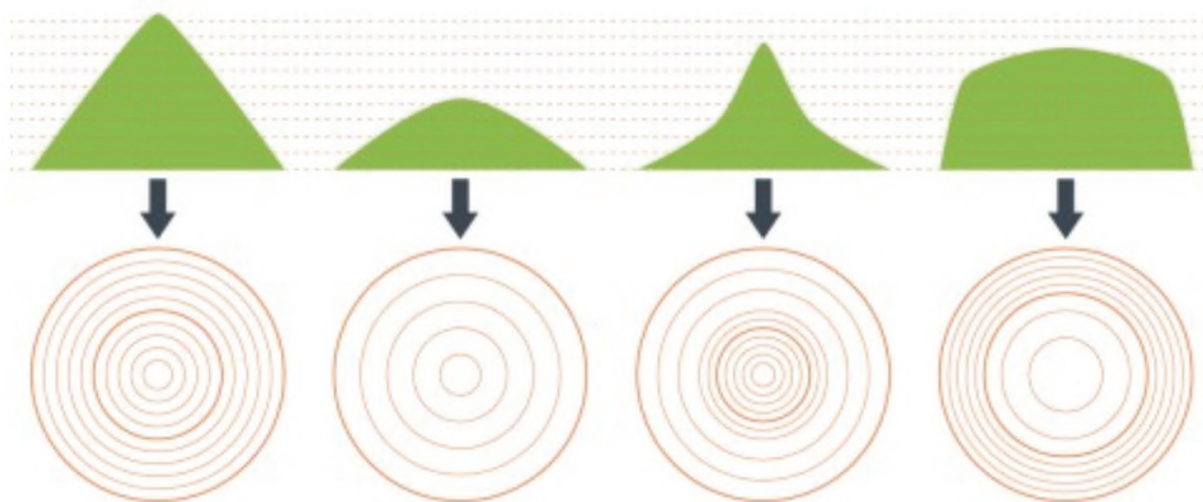
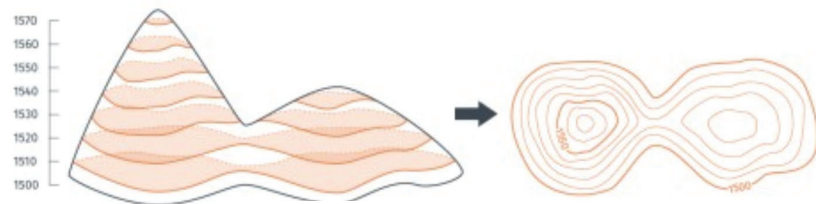


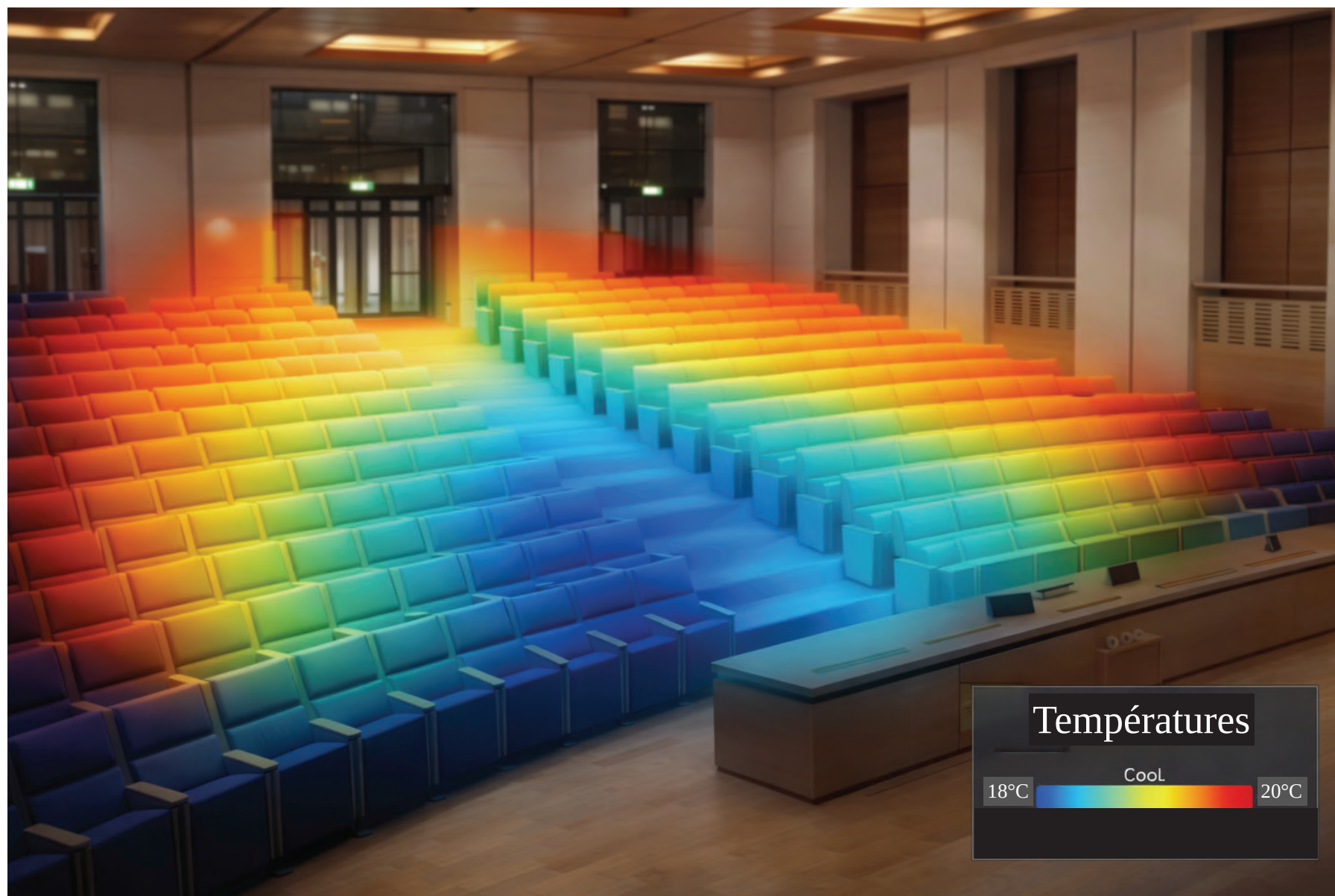
$$z = T(x, y)$$

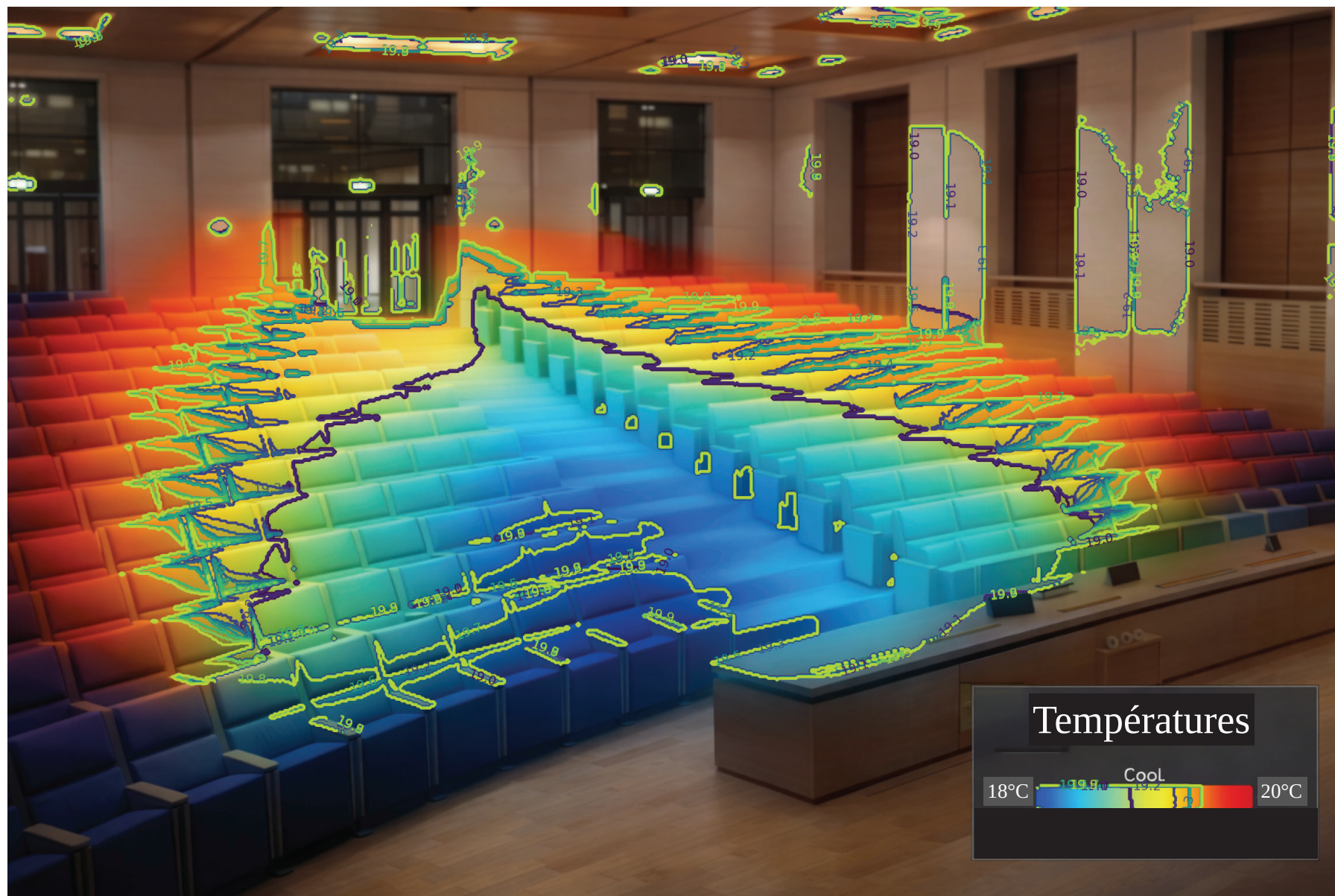
















Quand le tableau ne suffit plus !













On joint le geste à la parole

DeeVid AI

Animation réalisée par Chat GTP et Runway

Danse tes Maths

Danse tes Maths

Premier film : vecteurs
et matrices

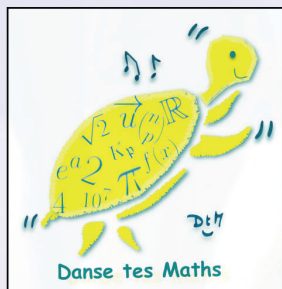
Deuxième film :
l'angle droit

Presse & Médias

LARA THOMAS - HOME

Danse tes Maths

Apprendre et transmettre les mathématiques par la danse.



• Présentation

« **Danse tes maths** » c'est faire danser les élèves sur des notions mathématiques pour en donner une approche nouvelle, rendre les mathématiques vivantes et se les approprier par le corps.

Le projet a été inspiré par le clip vidéo de la mathématicienne américaine Nancy Scherich dans lequel elle transcrit par la danse le sujet de sa thèse : la théorie des tresses (prix coup de cœur 2017 du concours Dance your PhD aux US) : [Representations of the braid group](#). L'idée est venue alors d'appliquer cette démarche dans un **contexte pédagogique**.

• Objectifs

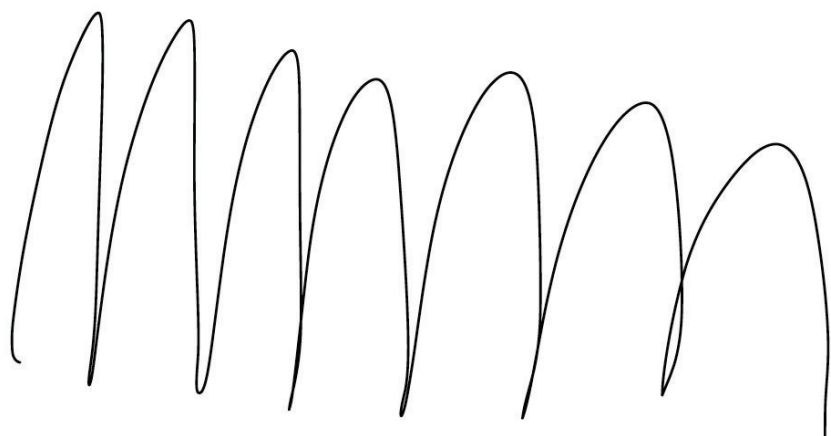
Les objectifs sont nombreux :

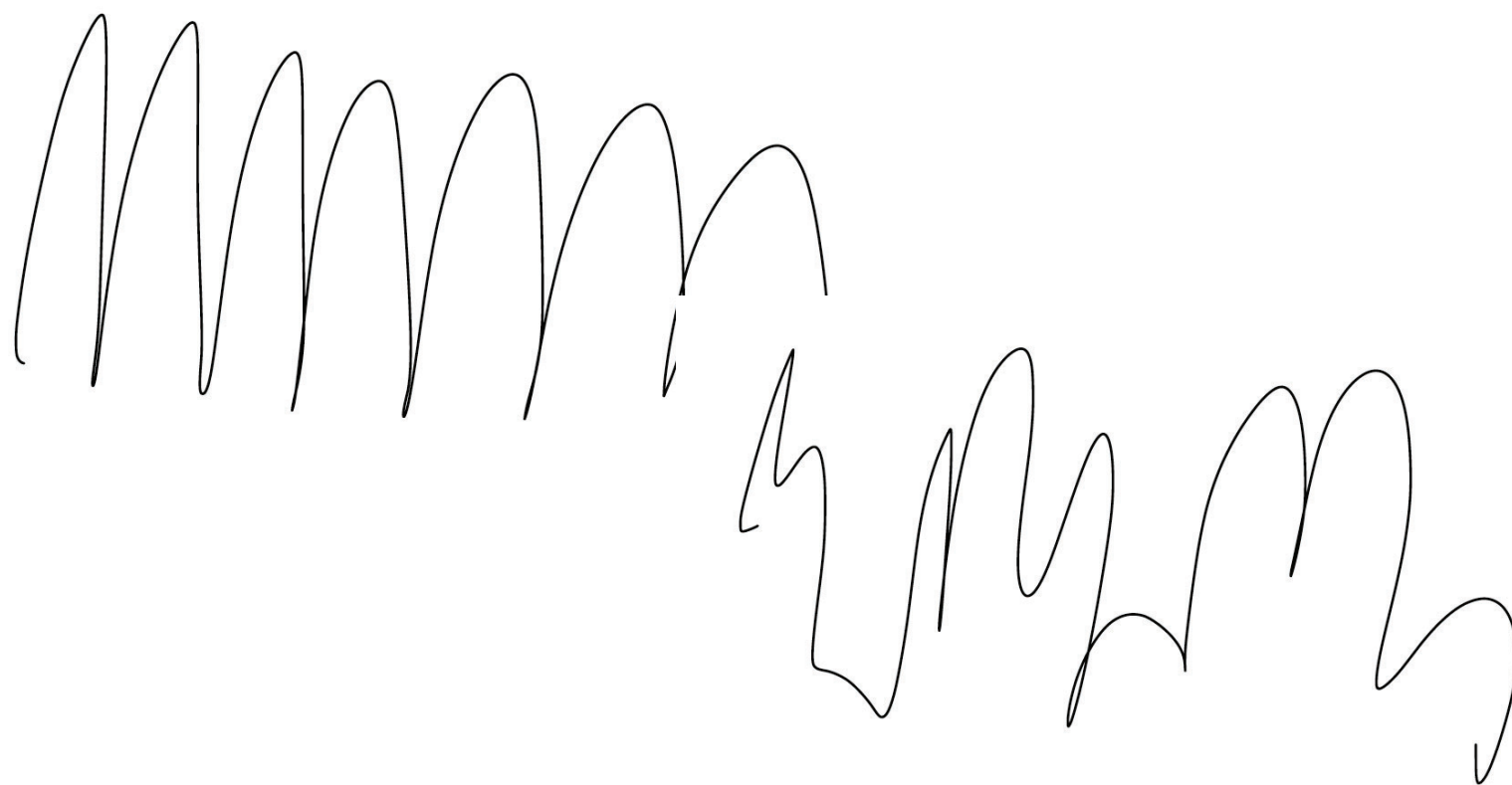
- expérimenter une **pratique pédagogique nouvelle** ;
- utiliser le **langage du corps** pour comprendre et exprimer des notions mathématiques ; leur donner de la **vie** et du **mouvement** ;
- diffuser et faire comprendre **les mathématiques qui nous entourent** ;
- enrichir les **relations enseignants et élèves / étudiants** ;
- bousculer certains stéréotypes en valorisant **la place de tous** dans les maths et la danse ;
- offrir une **ouverture culturelle** nouvelle et très valorisante.

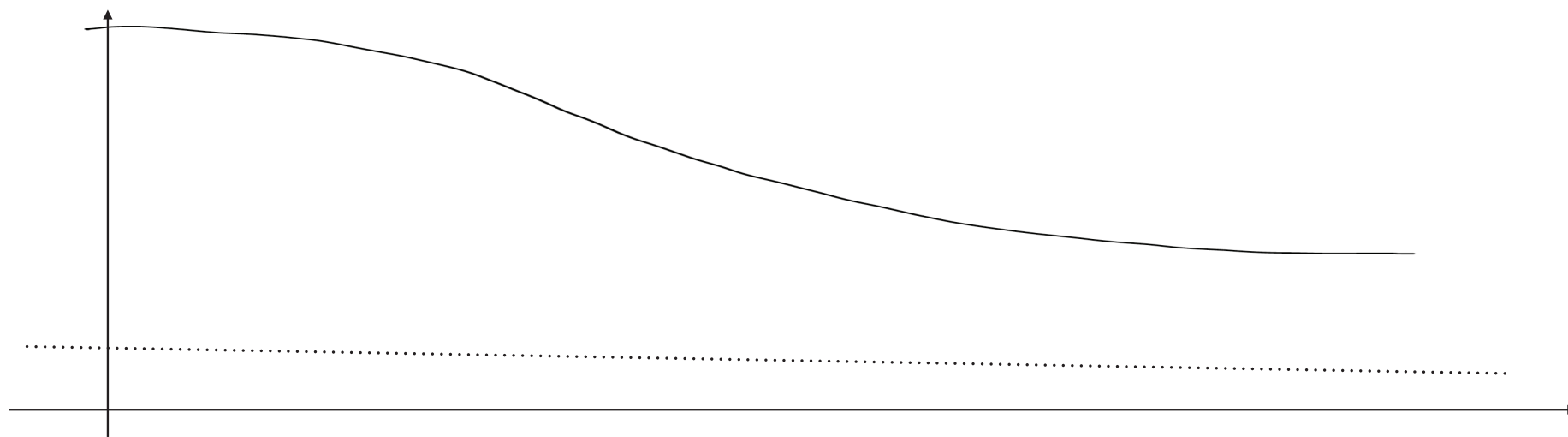
• Danser !

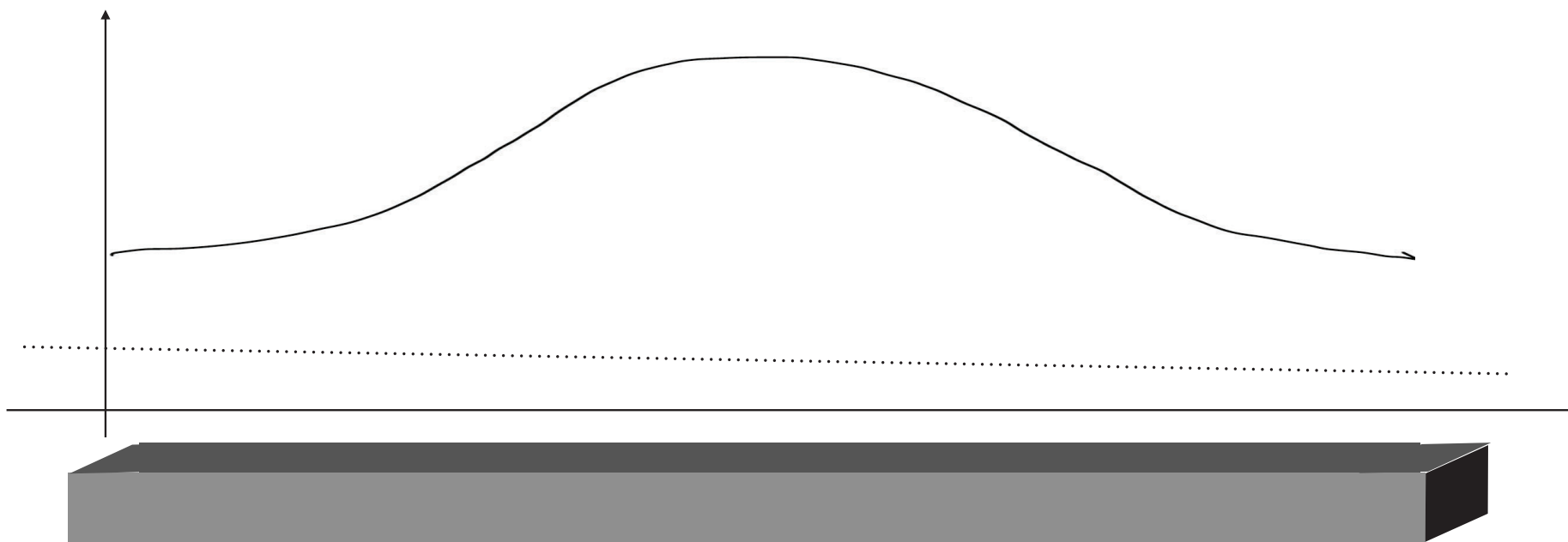
La danse permet de :

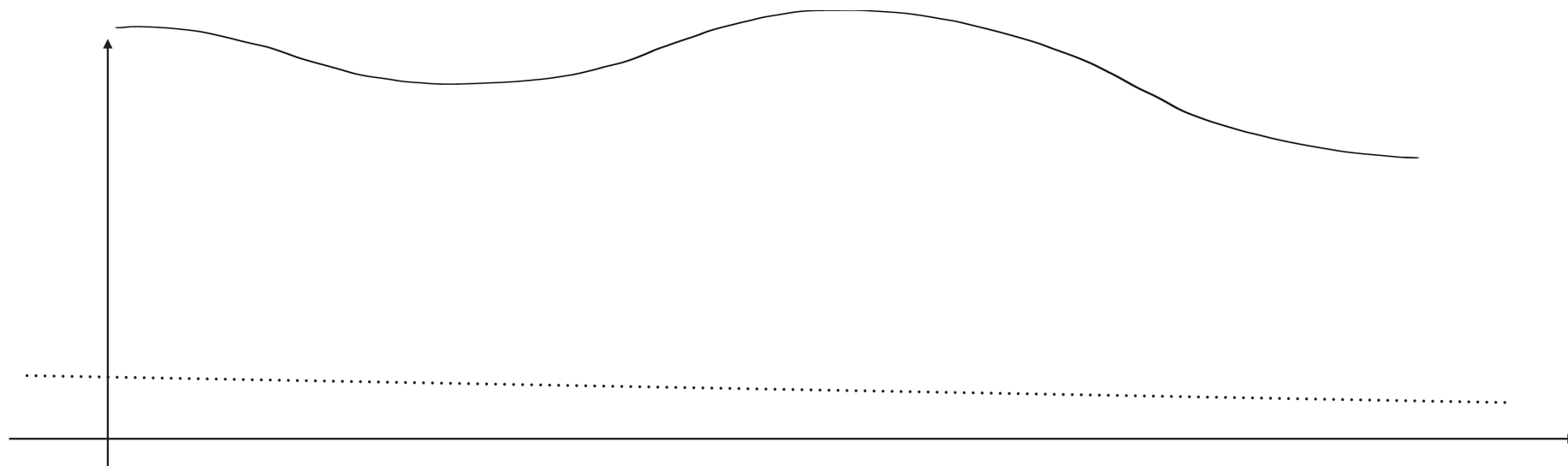
- créer des **émotions** autour de concepts mathématiques ;
- communiquer directement par le **langage universel du corps** (langage visuel) ;
- **transmettre** à celui qui regarde en intégrant l'**esthétisme** de l'image et du son.

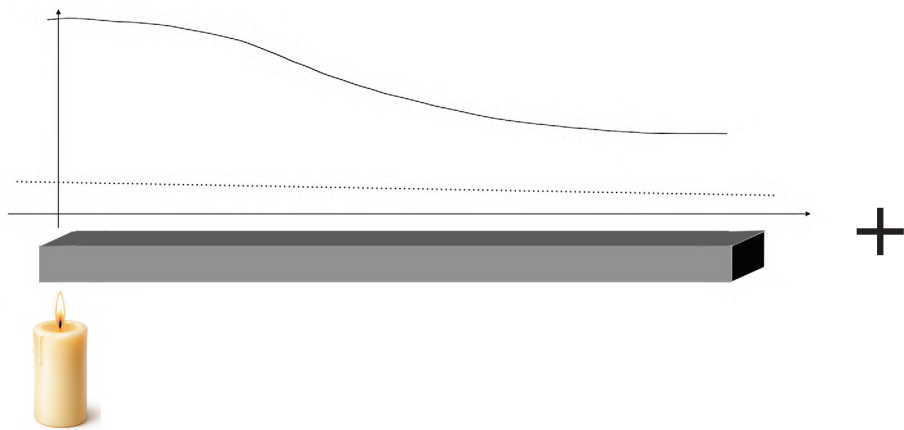




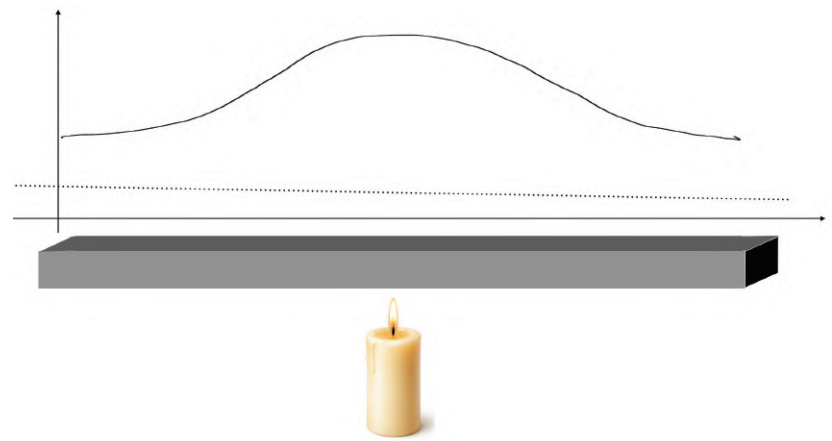




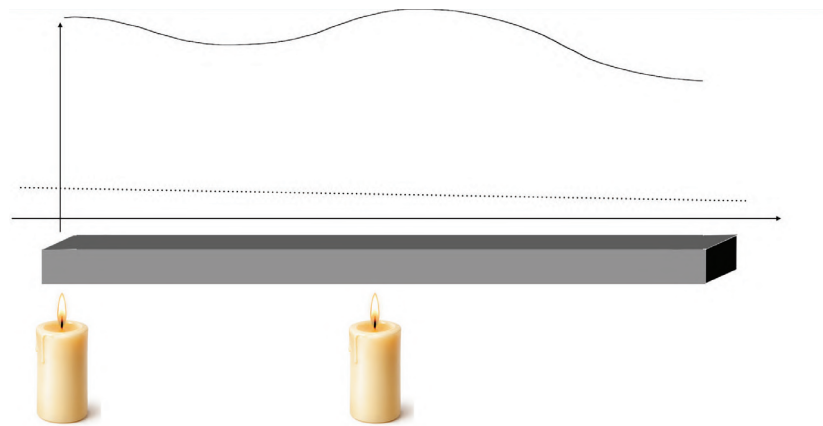




+



=







+

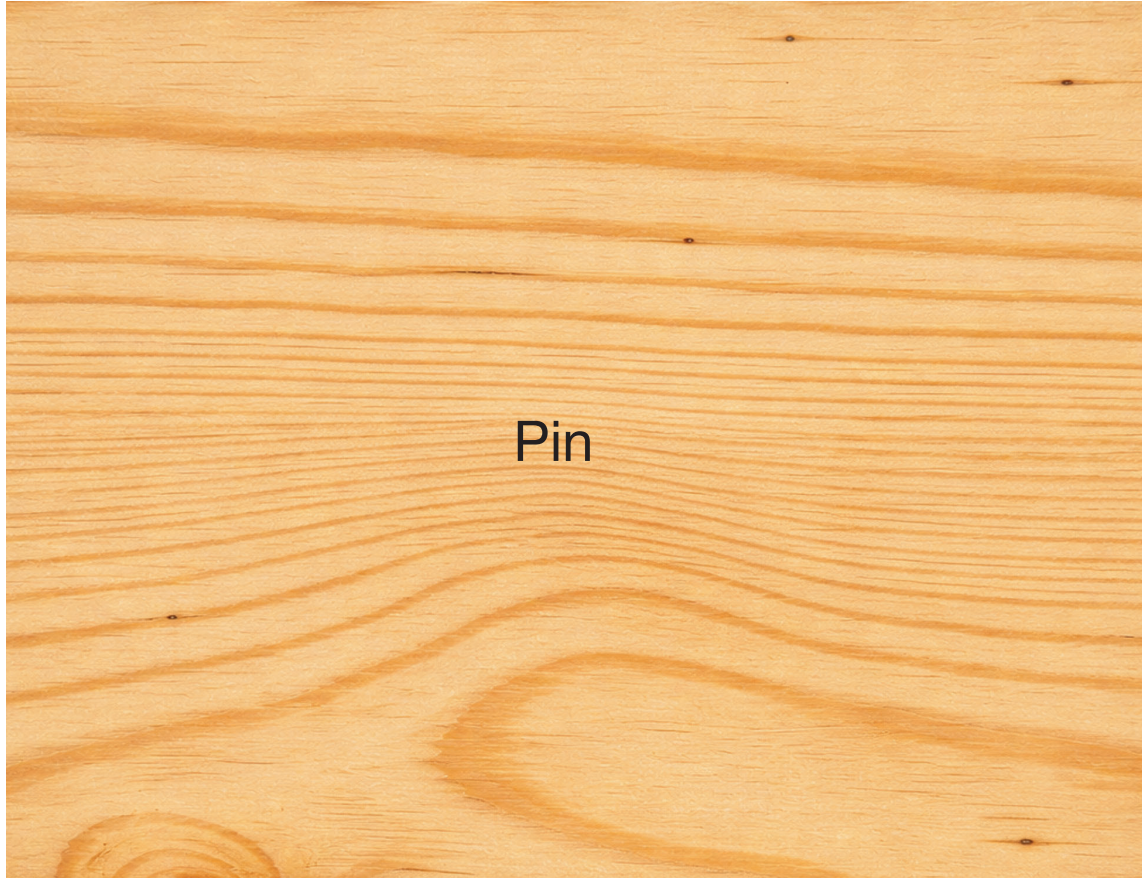
2 fois

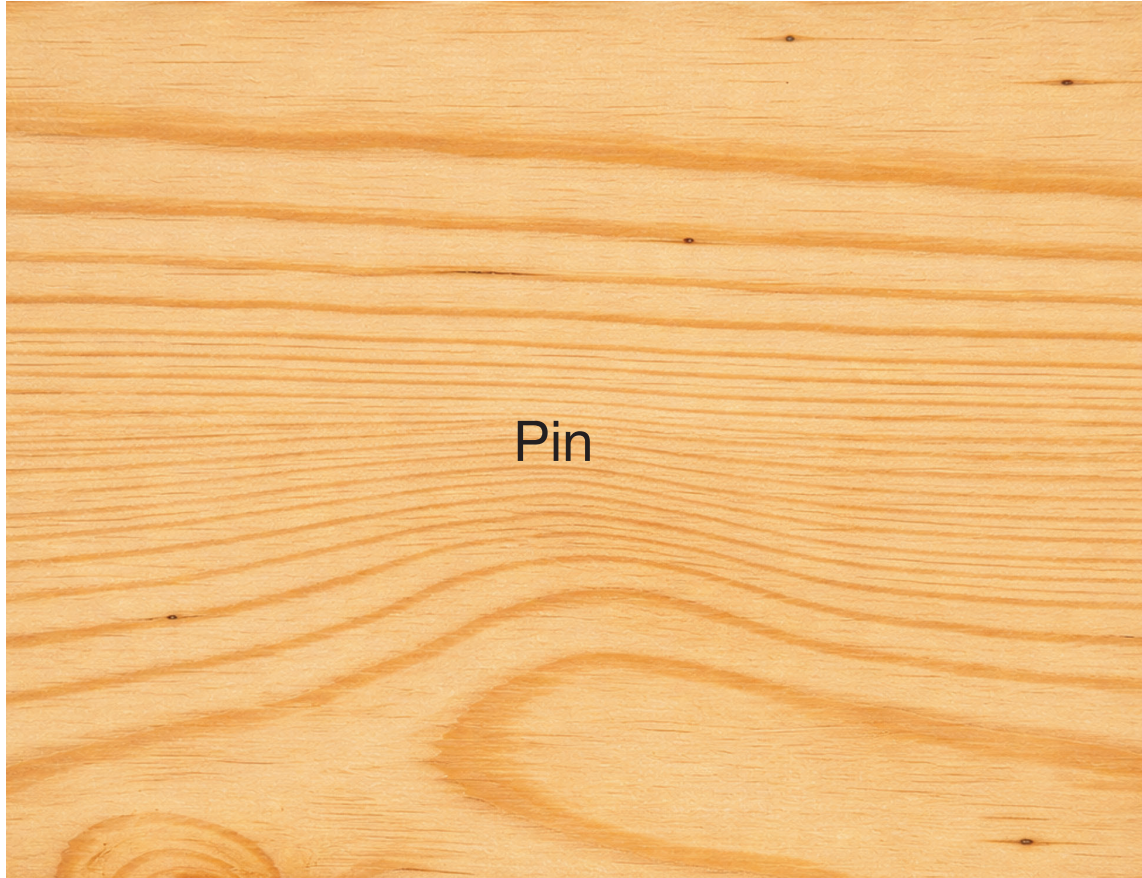


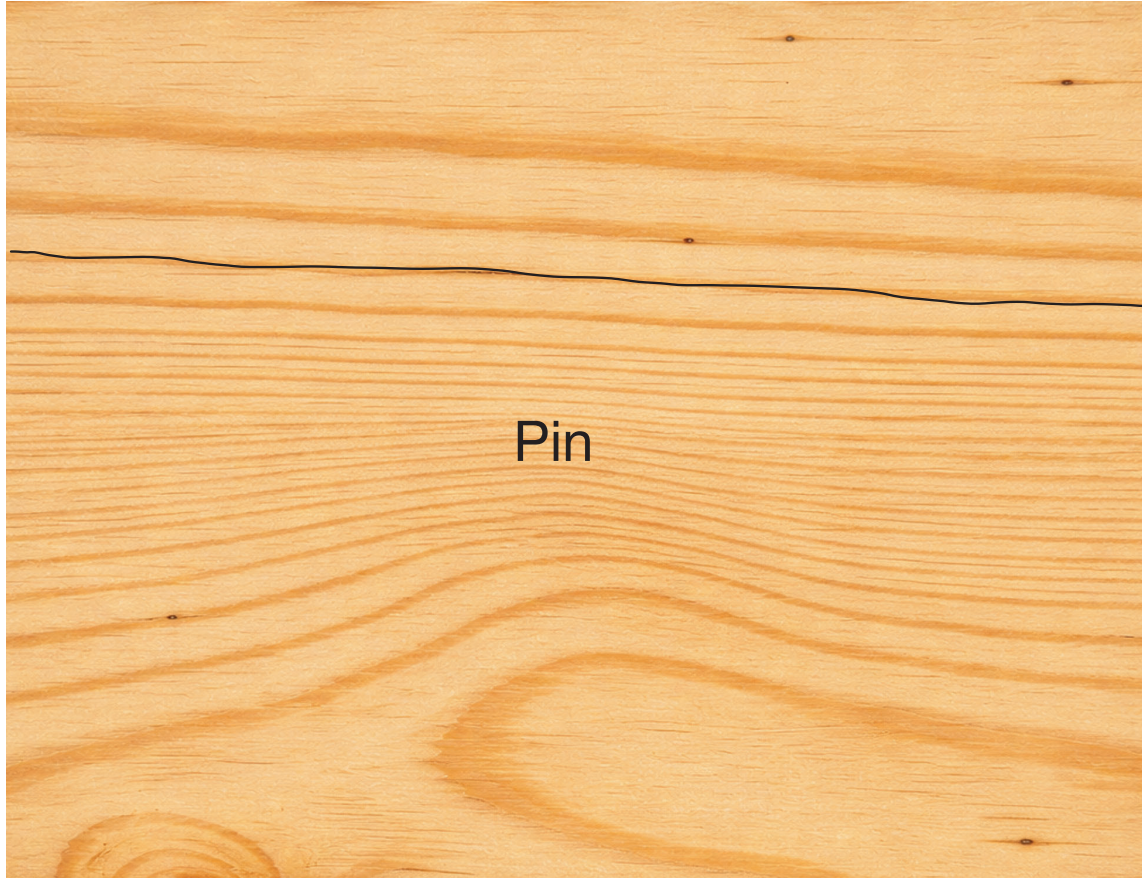


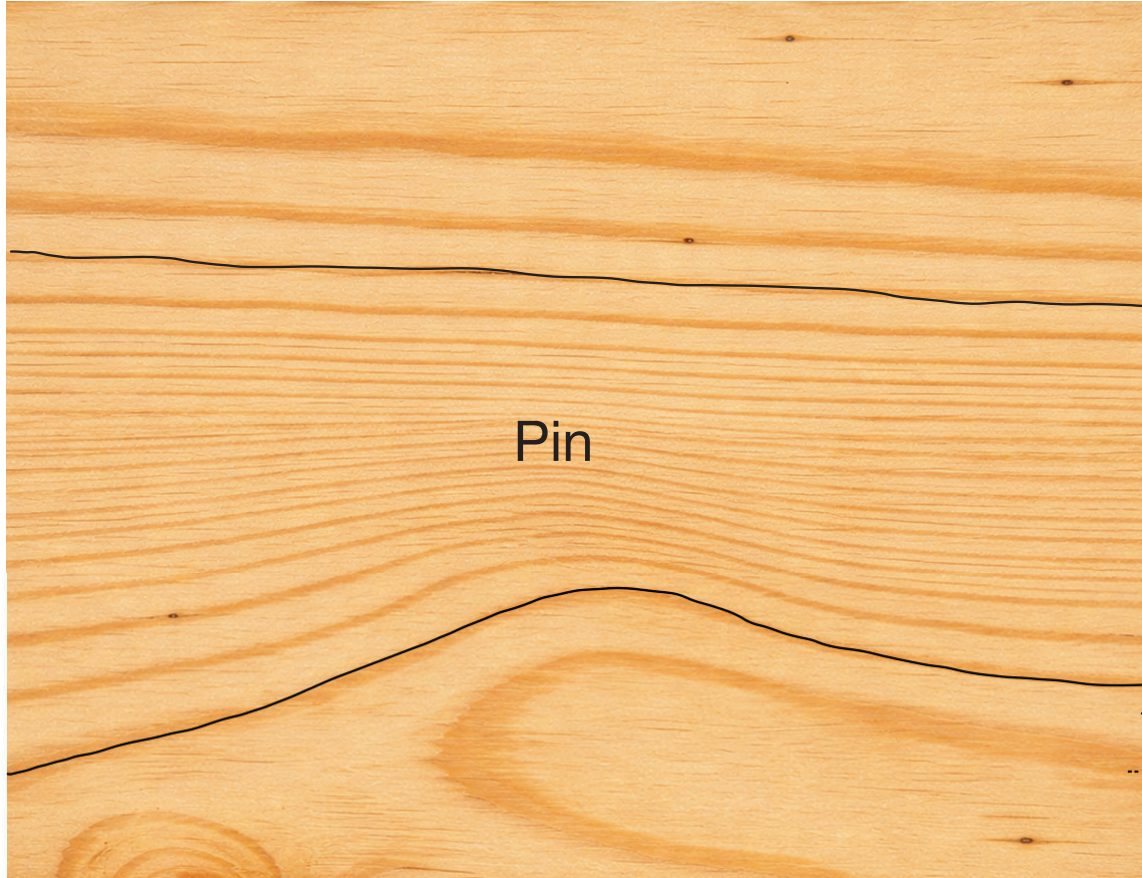


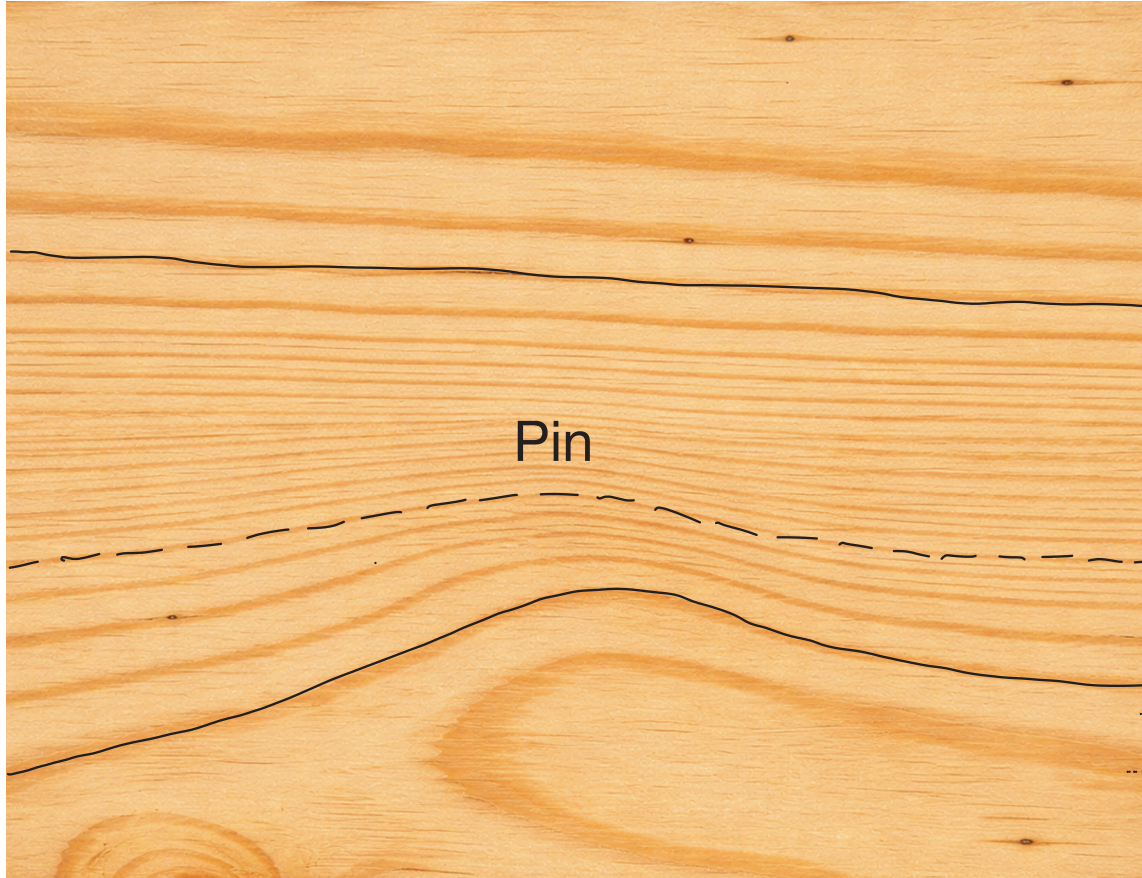
érable





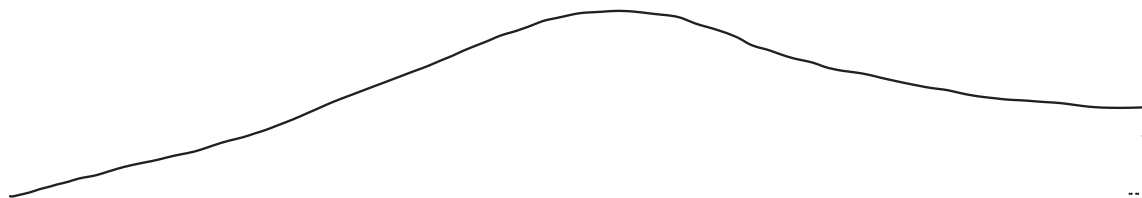
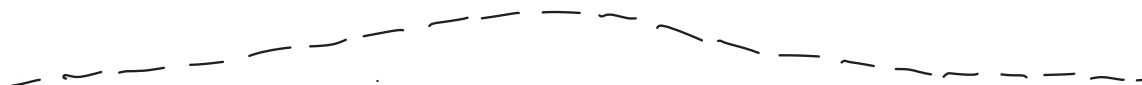


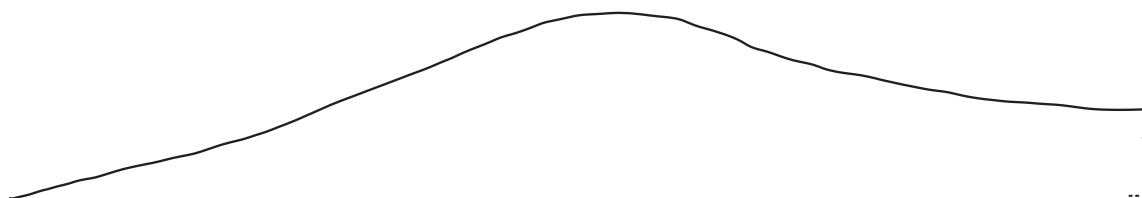
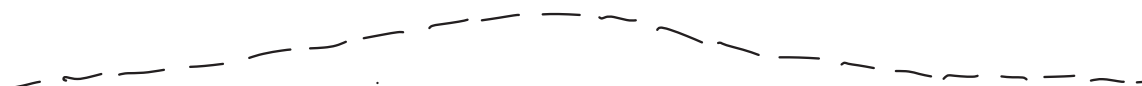


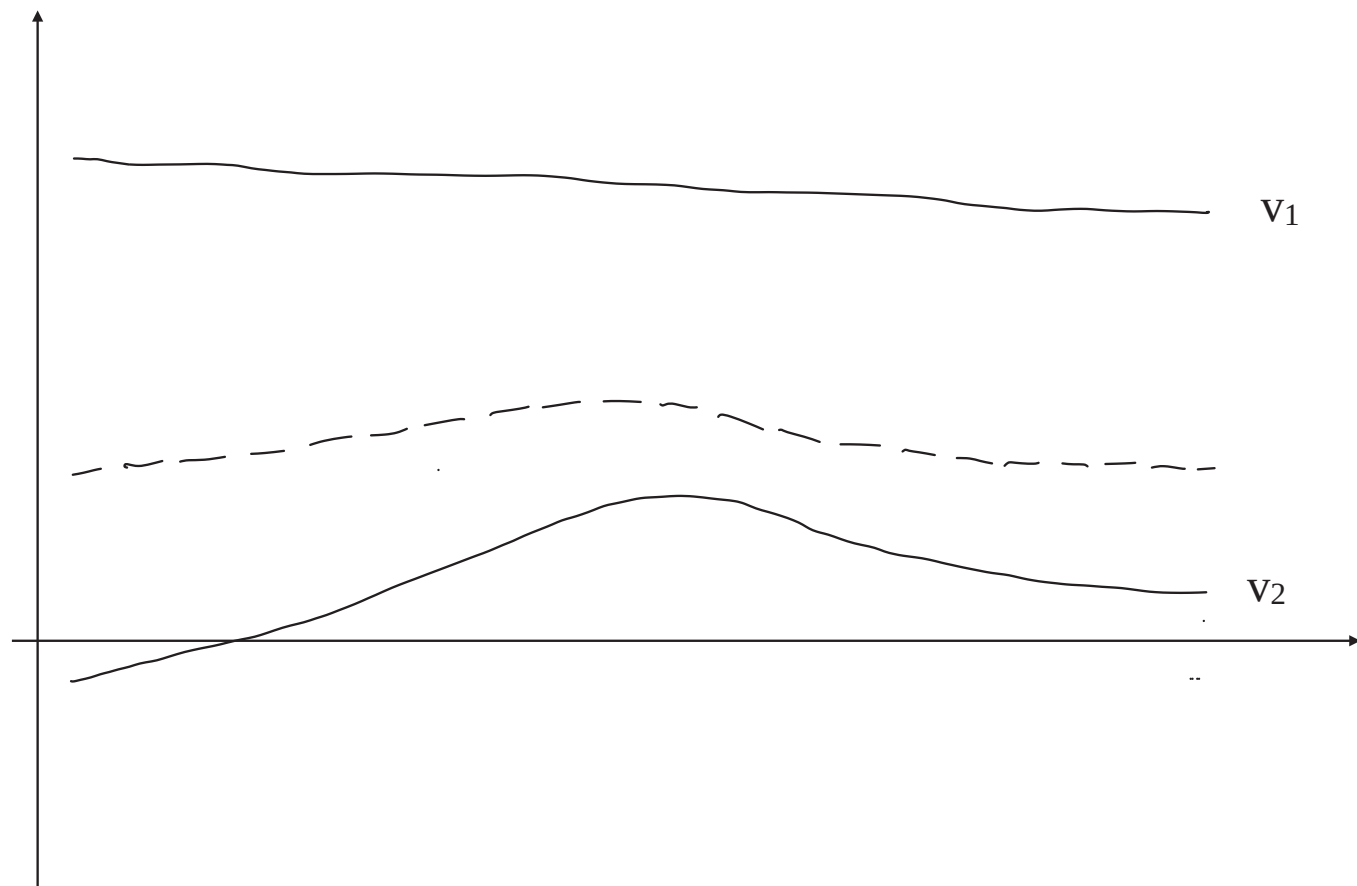


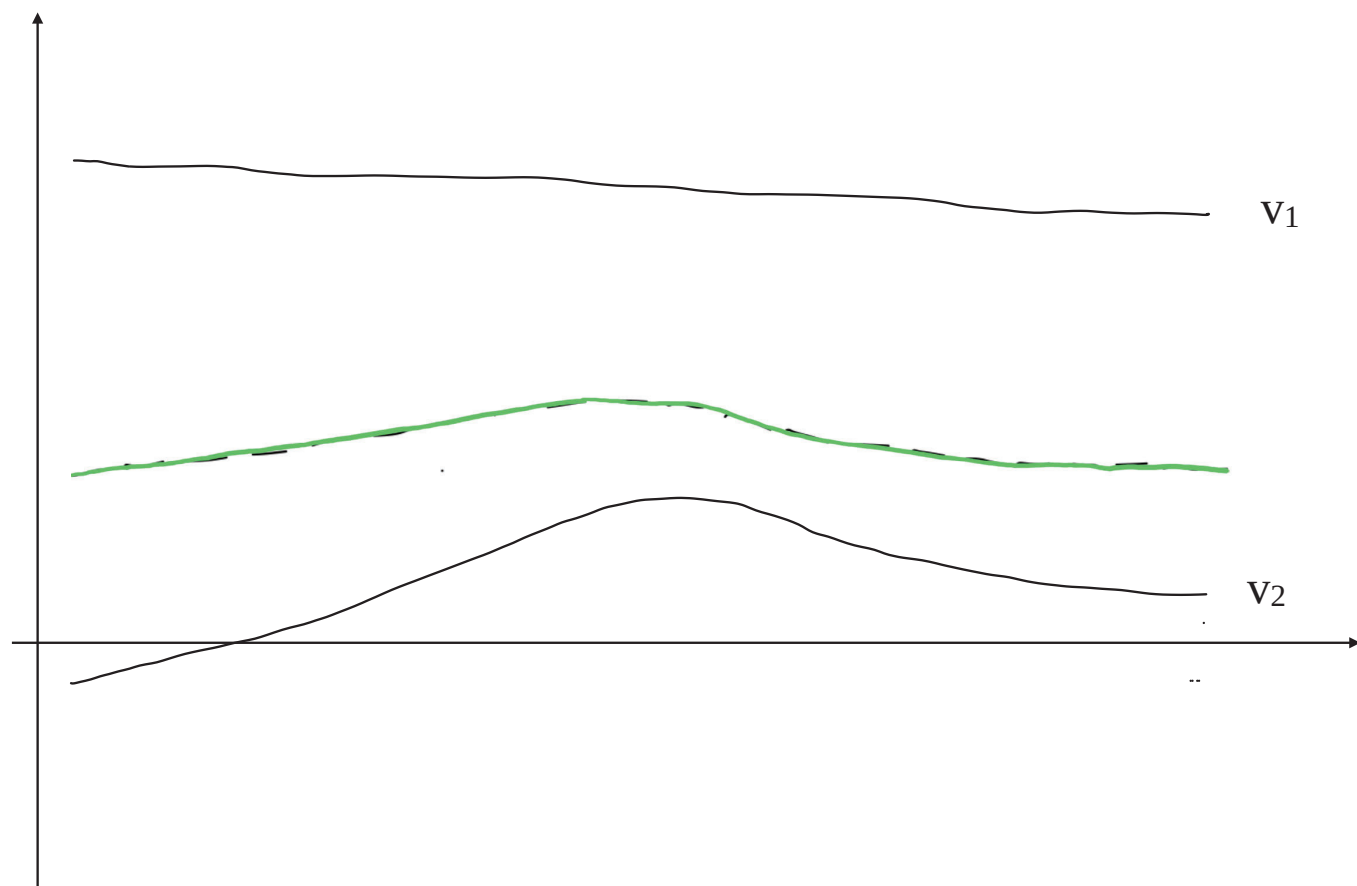


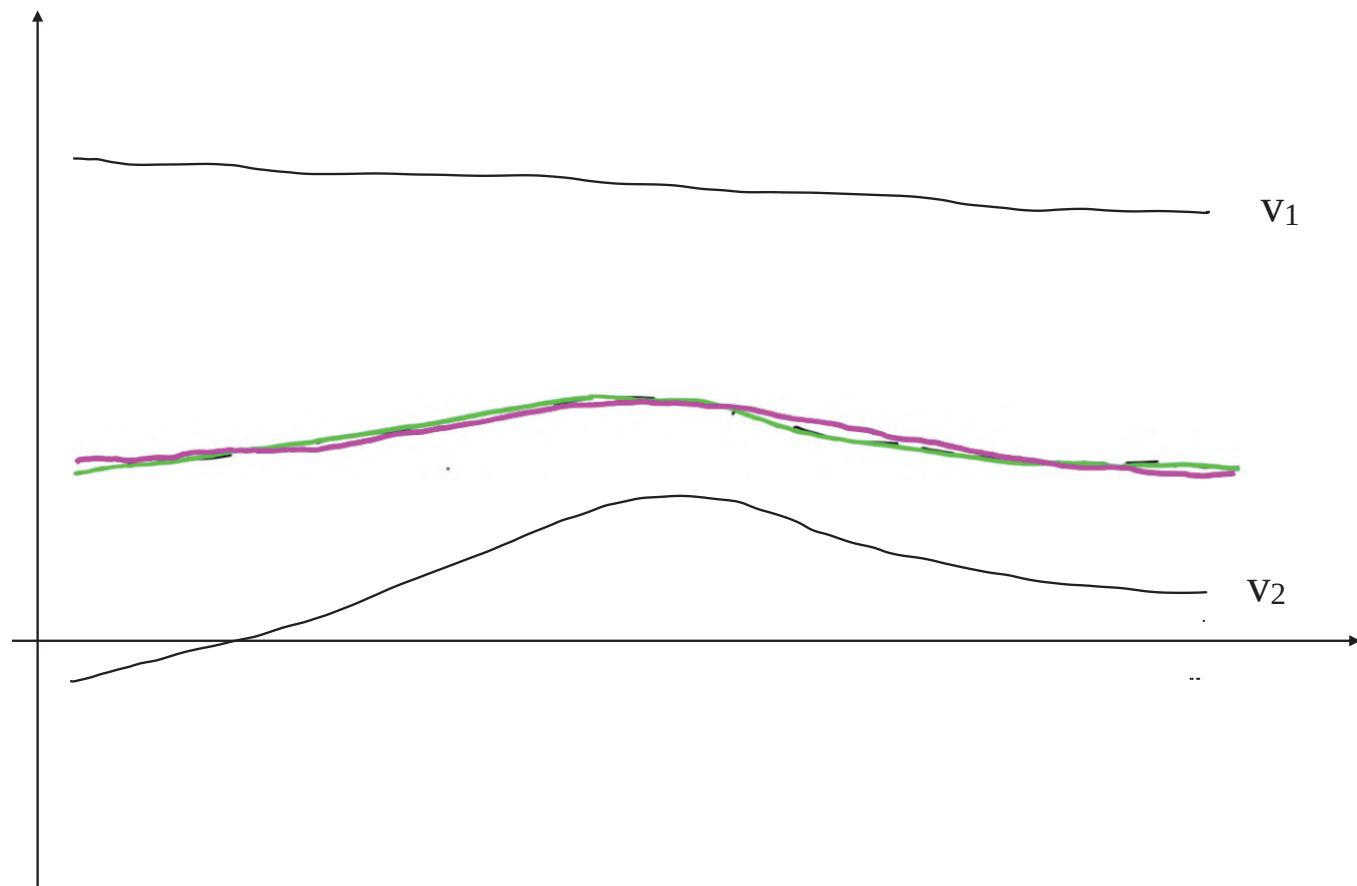
Pin



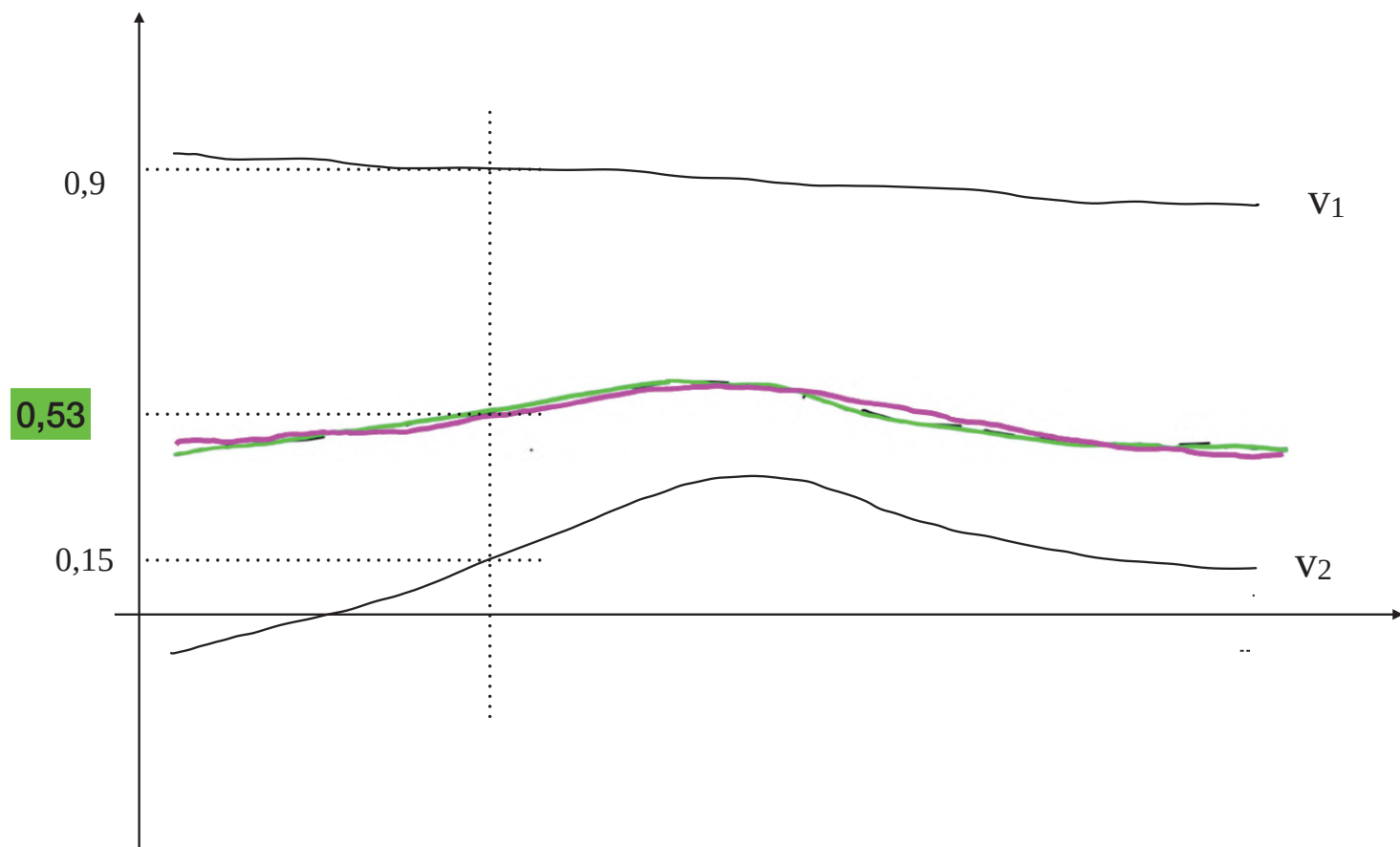








$$0.4369 v_1 + 0.9016 v_2$$

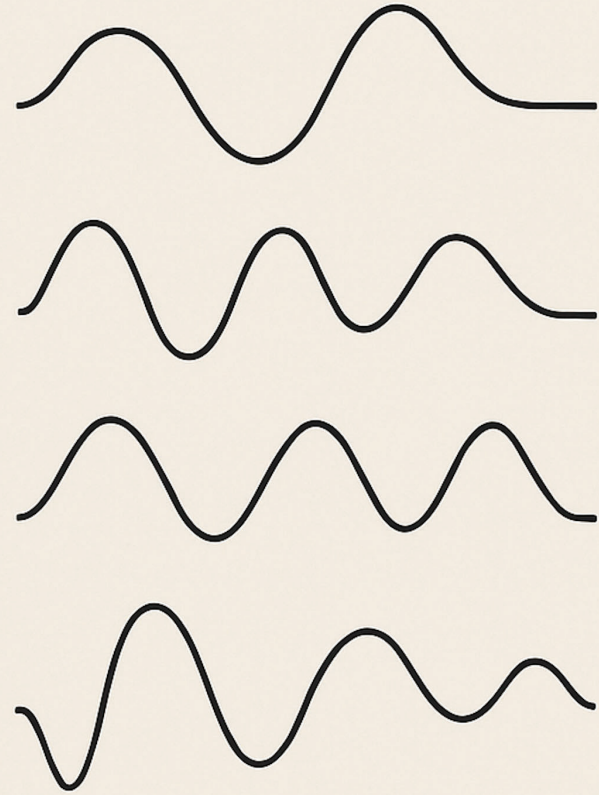


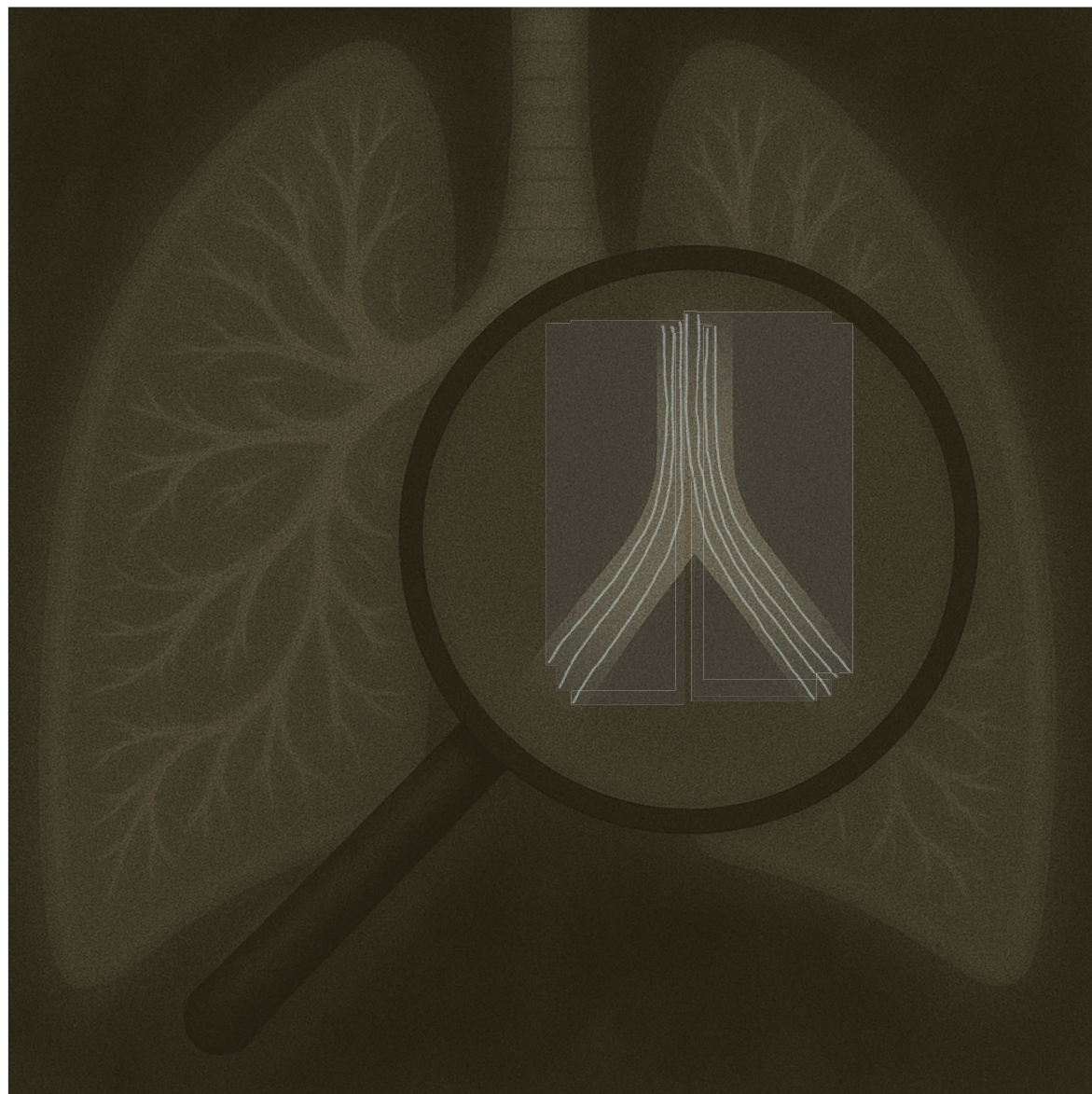


chêne

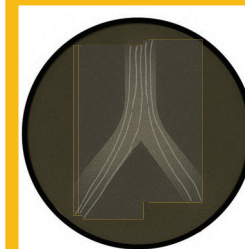


Réduction de complexité

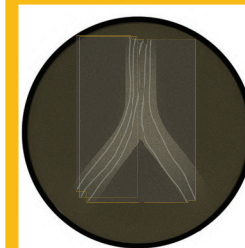




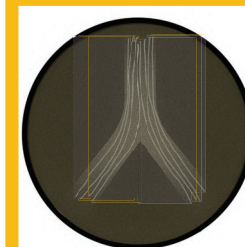
Réduction de
complexité



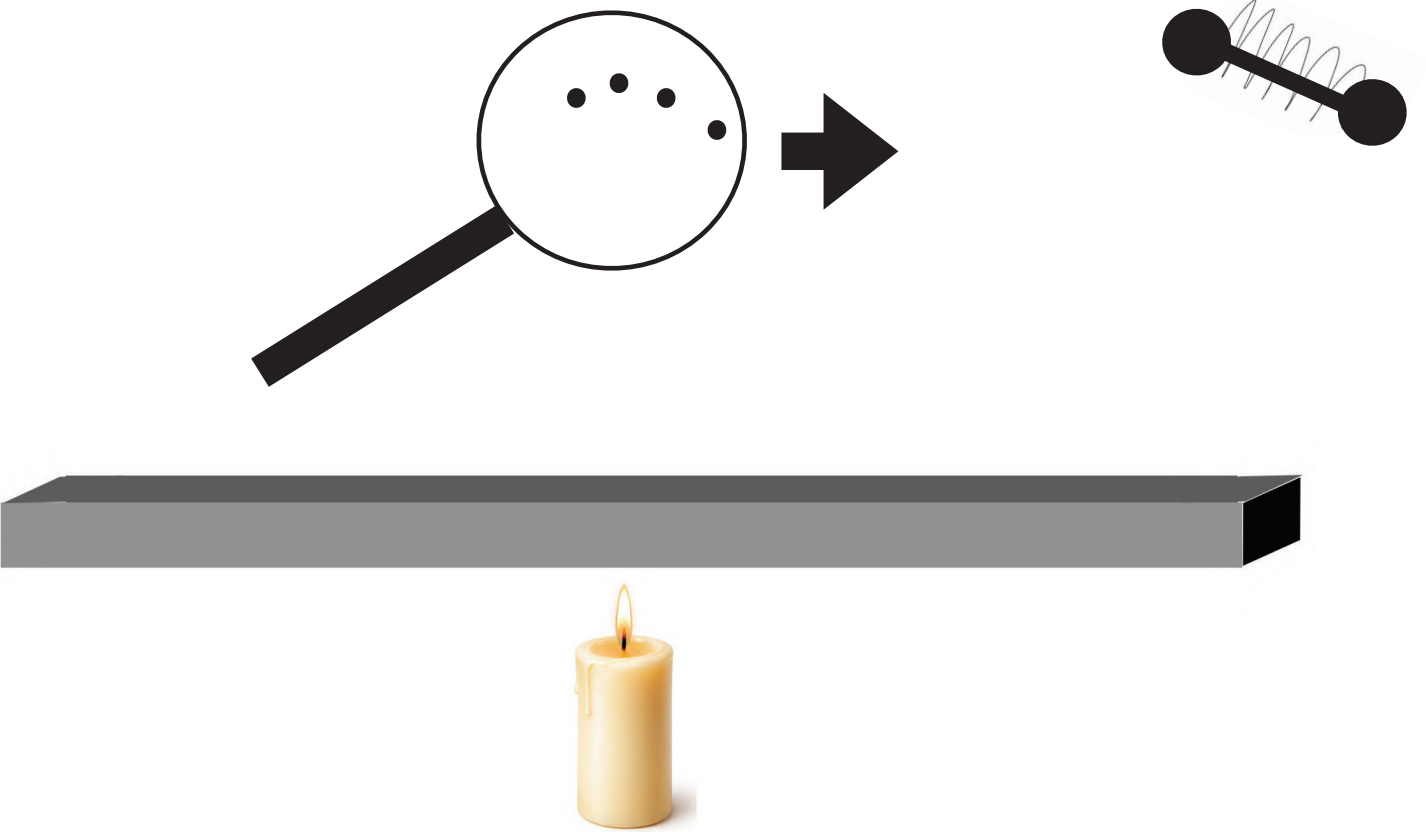
+



+

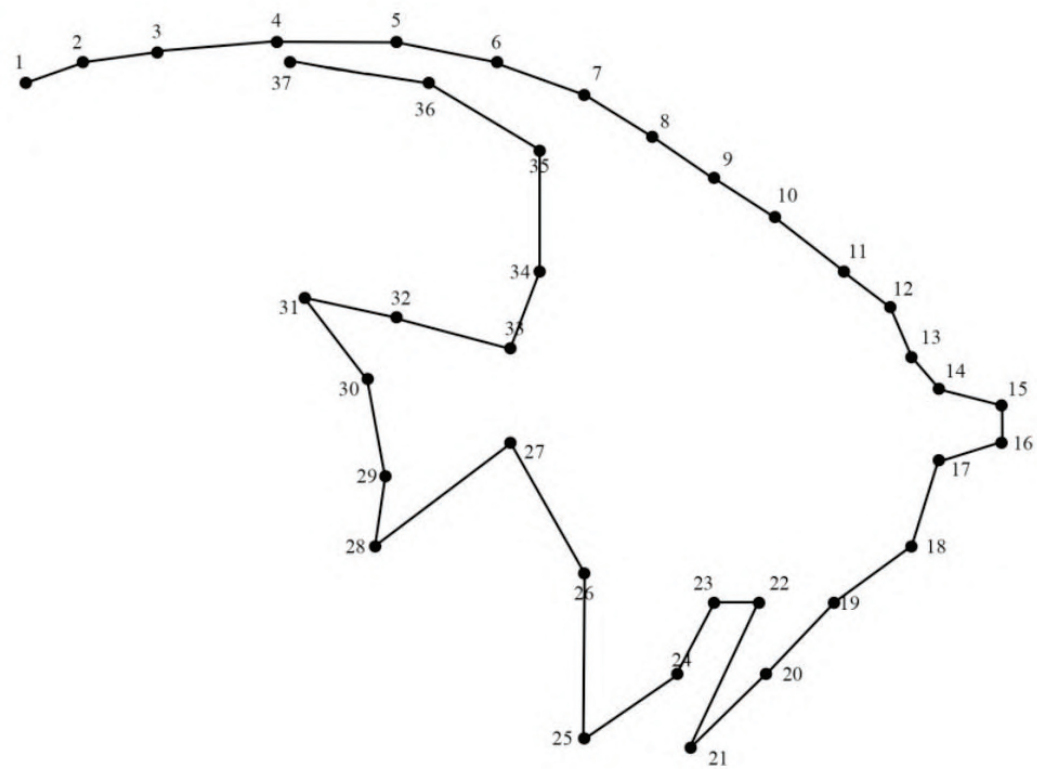


La notion de discrétisation de surface

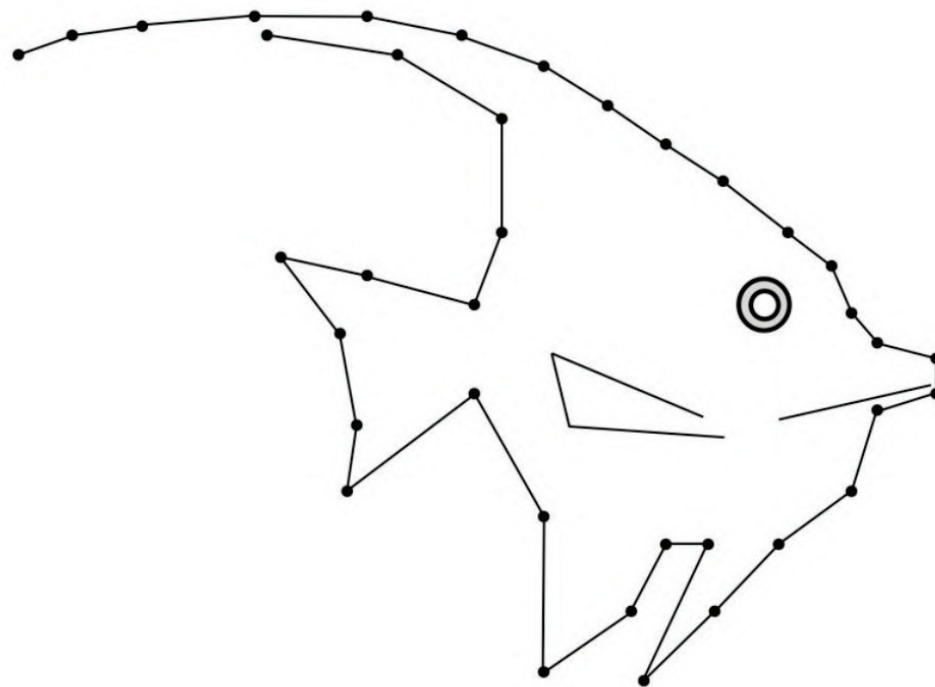




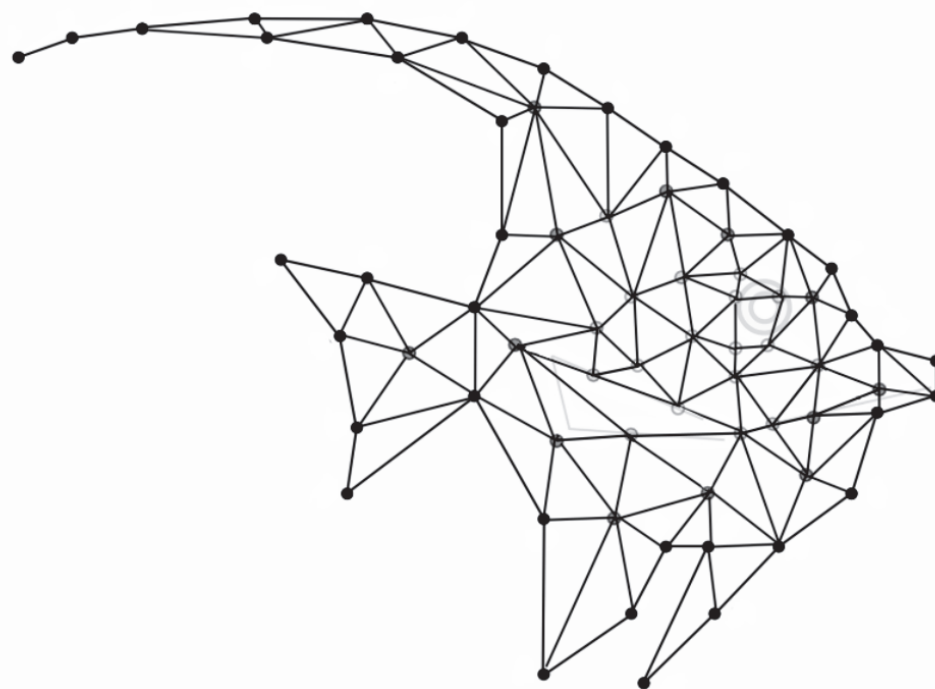
Animation réalisée par Joséphine Mounier



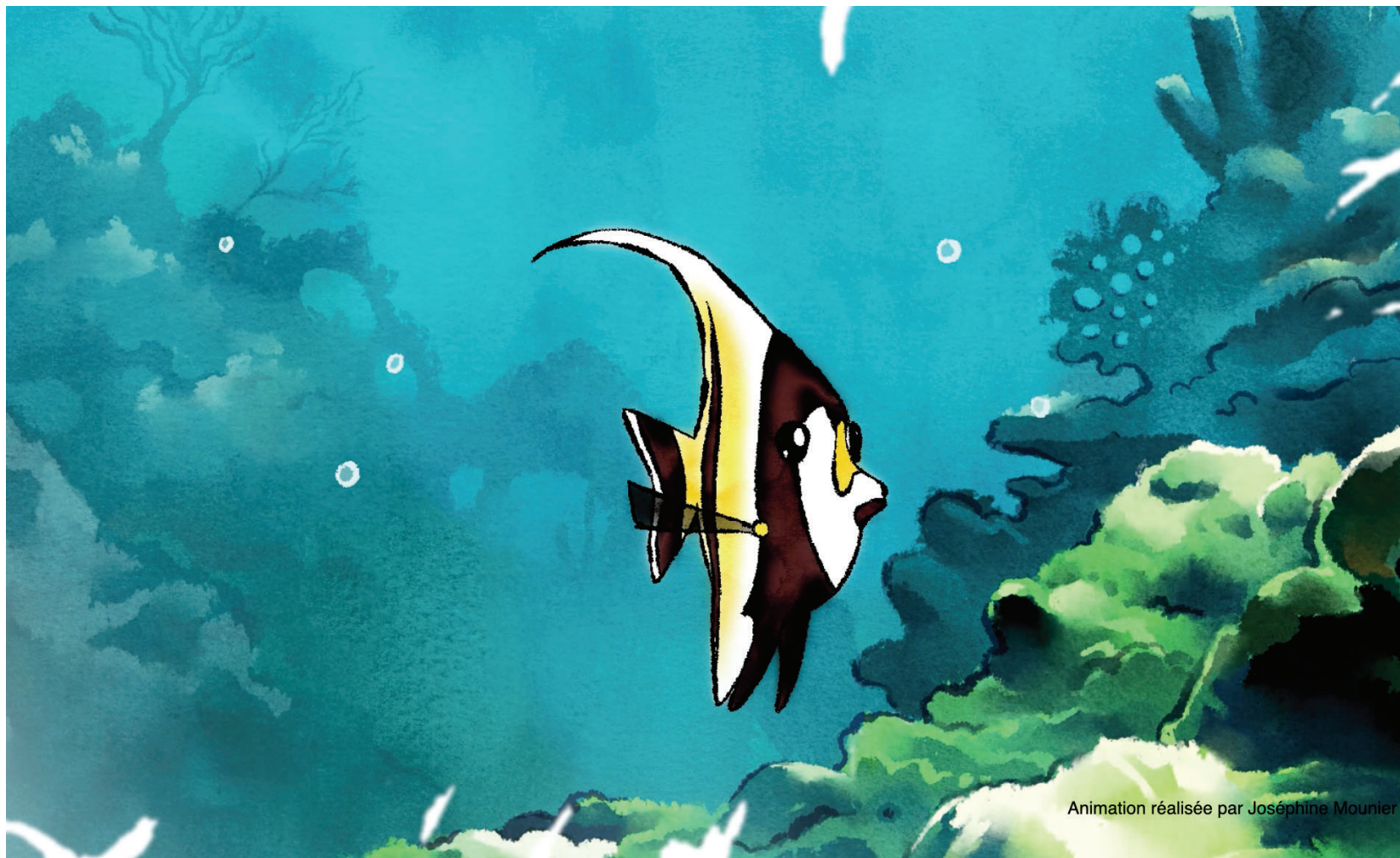
Animation réalisée par Joséphine Mounier



Animation réalisée par Joséphine Mounier



Animation réalisée par Joséphine Mounier



Animation réalisée par Joséphine Mounier

Pourquoi s'intéresse-t-on aux données ?

Pourquoi s'intéresse-t-on aux données ?

Il s'agit de

- comprendre ce qui se passe,
- identifier les moyens d'action sur le système,
- optimiser ou contrôler le résultat

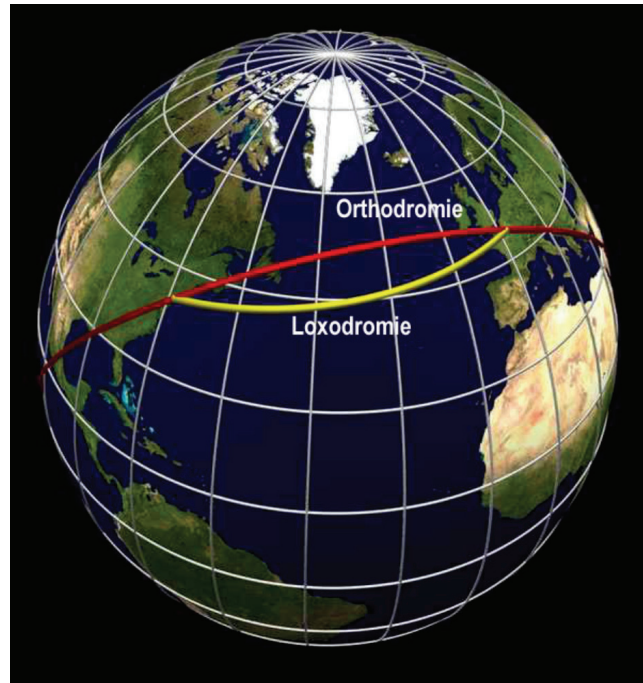
Pourquoi s'intéresse-t-on aux données ?

Il s'agit de

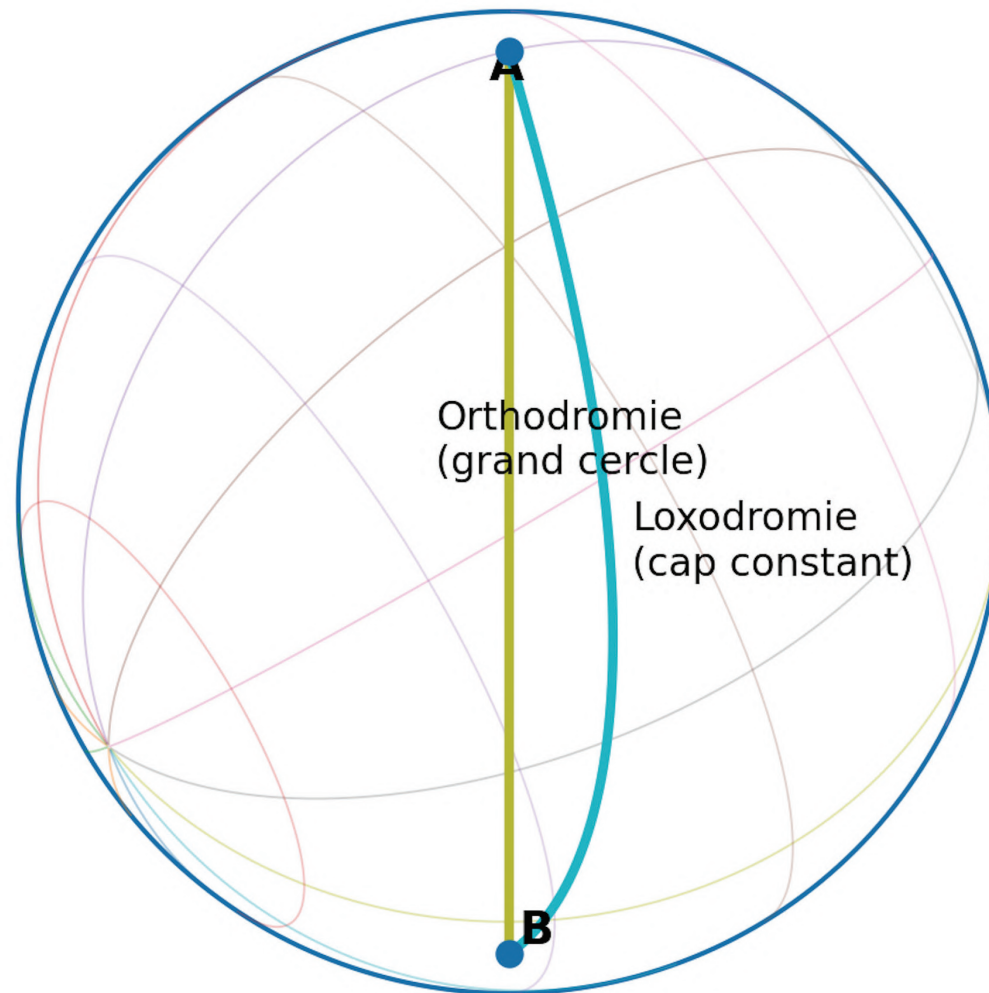
- comprendre ce qui se passe,
- identifier les moyens d'action sur le système,
- optimiser ou contrôler le résultat

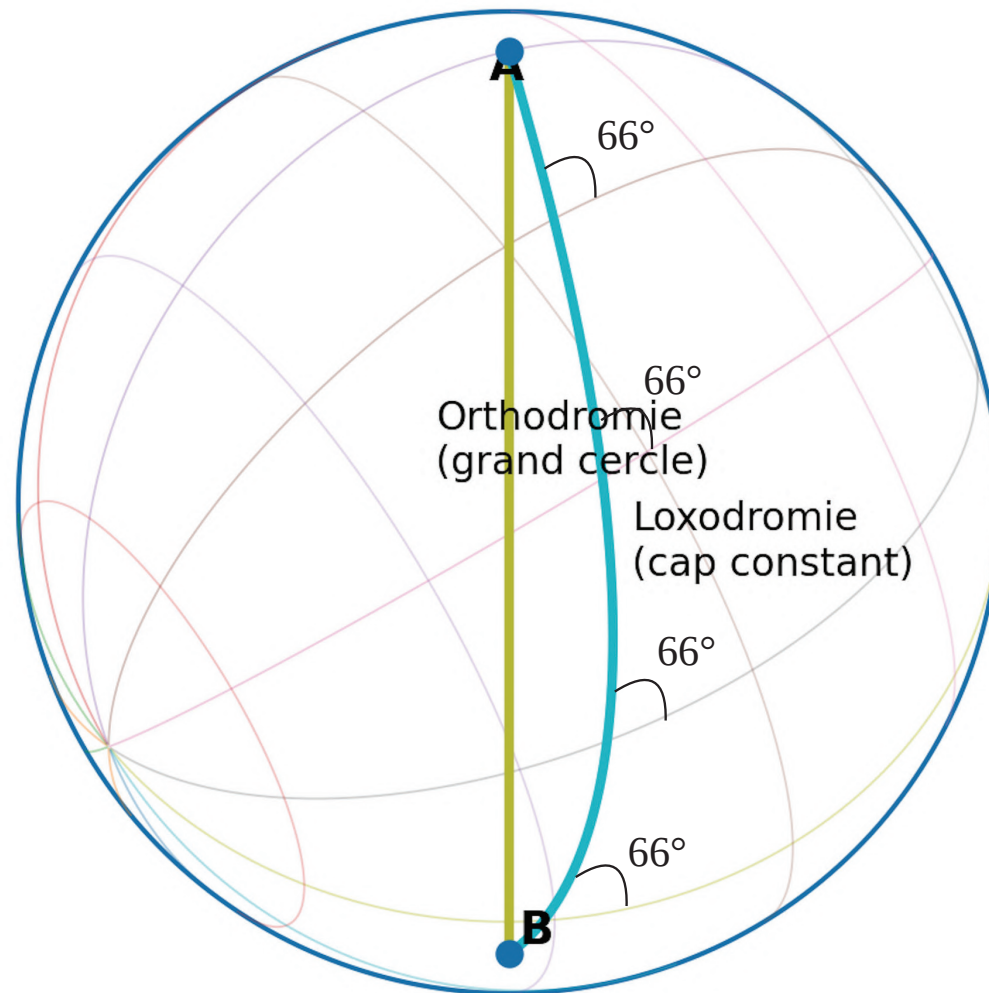
quelques exemples





<https://www.bel-horizon.eu/la-cartographie/notions-de-cartographie/projections-utm-et-variantes.html>







La fondation de Carthage - Gravure de Mathias Merian l'aîné - *Historische Chronica* - Frankfurt 1630



Derrière Alinghi souffle le savoir d'un prof de maths





Derrière Alinghi: le savoir

La Coupe de l'America est certes un duel sportif, mais c'est aussi une bataille technologique. Et c'est l'Ecole polytechnique de Lausanne qui est le partenaire chargé de donner au bateau une vitesse décisive. Et un homme: Alfio Quarteroni, professeur de mathématiques.

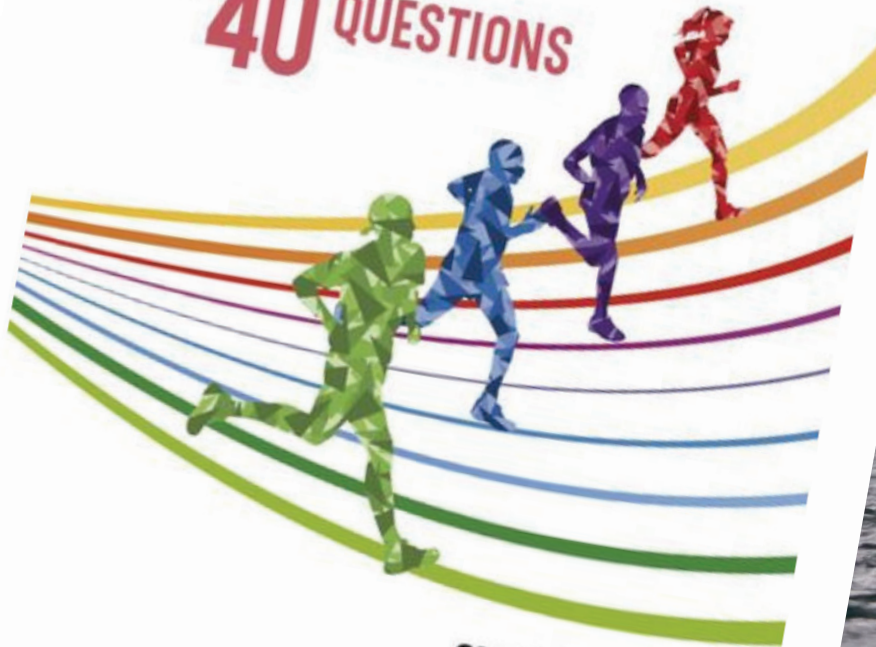


Q≡

AMANDINE AFTALION

POURQUOI EST-ON PENCHÉ DANS LES VIRAGES ?

LE **SPORT** EXPLIQUÉ
PAR LES SCIENCES
EN **40 QUESTIONS**



CNRS ÉDITIONS

IER

ais le
sole

ive. Et

La Coupe
c'est au
polyte
char
un
m



Des applications

ERC Synergy EMC2

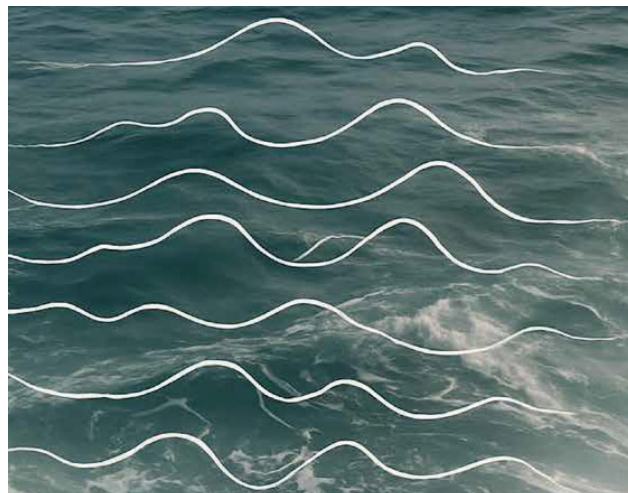
séminaire Maths-4-Innov-Action

relations maths - entreprises

INRIA et SMAI

ecole d'été CEA-EDF

GAMNI



Yvon MADAY

SORBONNE UNIVERSITÉ, LABORATOIRE JACQUES-LOUIS LIONS
CHAIRE ANNUELLE INFORMATIQUE ET SCIENCES NUMÉRIQUES
En partenariat avec Inria

COURS :

**Réduction de complexité
pour les simulations numériques :
méthodes, algorithmes
et analyse numérique associée**

SÉMINAIRE :

Maths-4-Innov-Action

24 fév. > 14 avril 2026

COLLÈGE
DE FRANCE
1530

Thomas Römer
Administrateur du Collège de France
11, place Marcellin-Berthelot, 75005 Paris
www.college-de-france.fr

Année
académique
2025/2026

Leçon inaugurale

Judi 19 février 2026 à 18h

Amphithéâtre Marguerite de Navarre

**Réduire la complexité pour maîtriser la résolution
des modèles mathématiques**

Cours & séminaire

Amphithéâtre Mireille Delmas-Marty – Les cours auront lieu le mardi,
de 9h30 à 11h. Ils seront suivis du séminaire de 11h15 à 12h15.

Mardi 24 février 2026

COURS :

Réduction de modèles pour EDP paramétrées

SÉMINAIRE :

Fabien Casenave (Safran)

Scientific Machine Learning for Industrial Design

Mardi 3 mars 2026

COURS :

Approximation et complexité

SÉMINAIRE :

Sylvain Vallaghe (Akseles)

Component-Based Reduced Order Modeling
for Large-Scale Industrial Digital Twins

Mardi 10 mars 2026

COURS :

Fusion modèle-données : approche PBDW

SÉMINAIRE :

Mickael Abbas & Jean-Philippe Argand (EDF R&D)

Maîtriser la complexité par la sobriété des simulations
numériques de la production d'énergie

Mardi 17 mars 2026

COURS :

Préservation des structures

SÉMINAIRE :

Dirk Hartmann (Siemens)

Digital Twins: From Hype to Industrial Reality...
and Why Applied Mathematics Plays a Key Role

Mardi 24 mars 2026

COURS :

Approximations non linéaires

SÉMINAIRE :

Between Physics and Data: A Critical Examination of
AI's Role in Simulation-Driven Product Development
Haysam Telib (Optimad, ESTECO)

Mardi 31 mars 2026

COURS :

Analyse numérique des méthodes non linéaires

SÉMINAIRE :

Guillaume Enchery (IFPEN)

Accélération de simulations d'écoulements en milieu
poreux par la méthode des bases réduites

Mardi 7 avril 2026

COURS :

Approches heuristiques et apprentissage (1)

SÉMINAIRE :

Christine Funfschilling (SNCF)

Mesures embarquées et modèles physiques : un
enrichissement réciproque en dynamique ferroviaire

Mardi 14 avril 2026

COURS :

Approches heuristiques et apprentissage (2)

SÉMINAIRE :

Joël Mousterde (SKF)

Apprentissage automatique informé par la physique
pour la modélisation de systèmes dynamiques :
cas d'un palier magnétique actif axial

Colloque

22-24 juin 2026

Amphithéâtre Mireille Delmas-Marty de 9h à 18h

**Aspects mathématiques et appliqués des méthodes
de réduction de complexité**

Image : © Yvon Maday, image générée par une I.A.

Les cours, séminaires et colloques sont en libre accès,
dans la limite des places disponibles.

La modélisation mathématique

La modélisation mathématique

L'équation de transport $\partial u / \partial t = c \partial u / \partial x$ $u(x, t) = u_0(x + ct),$

La modélisation mathématique

L'équation de transport	$\partial u / \partial t = c \partial u / \partial x$	$u(x, t) = u_0(x + ct),$
L'équation de la chaleur	$\partial u / \partial t = D \Delta u$	

La modélisation mathématique

L'équation de transport $\partial u / \partial t = c \partial u / \partial x$ $u(x, t) = u_0(x + ct),$

L'équation de la chaleur $\partial u / \partial t = D \Delta u$

Les équations de Navier-Stokes $\partial u / \partial t + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u$ $\nabla u = 0$

La modélisation mathématique



La modélisation mathématique

L'équation de transport $\partial u / \partial t = c \partial u / \partial x$ $u(x, t) = u_0(x + ct),$

L'équation de la chaleur $\partial u / \partial t = D \Delta u$

Les équations de Navier-Stokes $\partial u / \partial t + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u$ $\nabla u = 0$

L'équation de Poisson $\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon}$

La modélisation mathématique

L'équation de transport $\partial u / \partial t = c \partial u / \partial x$ $u(x, t) = u_0(x + ct),$

L'équation de la chaleur $\partial u / \partial t = D \Delta u$

Les équations de Navier-Stokes $\partial u / \partial t + u \cdot \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u$ $\nabla u = 0$

L'équation de Poisson $\Delta V = -\frac{\rho}{\varepsilon}$

L'équation des ondes $\partial^2 u / \partial t^2 = -c^2 \Delta u$

L'équation de Schrödinger $i \frac{\partial \Psi}{\partial t} + \Delta \psi = V \Psi$

La modélisation mathématique

L'équation de transport $\partial u / \partial t = c \partial u / \partial x$ $u(x, t) = u_0(x + ct)$.

Il convient de noter que les mêmes opérateurs

- opérateur de Laplace Δ
- opérateur de dérivé en temps $\frac{\partial}{\partial t}$
- de convection $v \cdot \nabla$

se combinent pour modéliser des phénomènes aussi différents.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \Delta \psi = v \cdot \nabla \psi$$

Étude mathématique des modeles

Étude mathématique des modeles

Le modèle n'est qu'un reflet de la réalité

et c'est un objet mathématique

Simulation numérique

Simulation numérique

La valeur de la quantité d'intérêt en un point dépend des valeurs alentour

Simulation numérique

La valeur de la quantité d'intérêt en un point dépend des valeurs alentour

Ce qui nous intéresse ce sont des courbes et des surfaces,
de façon générale des variétés, associées à la quantité d'intérêt.

Simulation numérique

La plupart du temps, ces solutions n'ont pas de forme analytique

Simulation numérique

La plupart du temps, ces solutions n'ont pas de forme analytique

- les méthodes des éléments finis
- les méthodes des volumes finis
- les méthodes des différences finies
- les méthodes spectrales
- les approximations par ondelettes
- les méthodes multi-résolution adaptative
- les méthodes iso-géométriques

Simulation numérique

La plupart du temps, ces solutions n'ont pas de forme analytique

- les méthodes des éléments finis
 - les méthodes des volumes finis
 - les méthodes des différences finies
 - les méthodes spectrales
 - les approximations par ondelettes
 - les méthodes multi-résolution
 - les méthodes iso-géométriques
- Il y a aussi les algorithmes utilisés pour les résoudre, comme
- les méthodes directes
 - les méthodes de gradient
 - les méthodes multigrilles
 - les méthodes de décomposition de domaine

Simulation numérique

Combien ça coûte ?

Simulation numérique

Combien ça coûte ?

quelque dizaines de milliards d'opérations par secondes

Simulation numérique

Combien ça coûte ?

- Pourquoi est ce que ça coûte de plus en plus cher
- on s'intéresse à des phénomènes plus complexes
 - on demande de plus en plus de précision
 - les domaines d'étude sont de plus en plus grands
 - les phénomènes sont de plus en plus couplés

Certification estimateur et indicateur d'erreur

Certification estimateur et indicateur d'erreur

D'un côté on a la réalité,

d'autre part les modèles enfin la simulation des modèles ..
donc au moins deux sources d'erreurs

- erreur du modèle
- erreur de la simulation

Certification estimateur et indicateur d'erreur

D'un côté on a la réalité,

d'autre part les modèles enfin la simulation des modèles ..
donc au moins deux sources d'erreurs

- erreur du modèle
- erreur de la simulation

les estimateurs *a priori* et les estimateurs *a posteriori*.

Certification estimateur et indicateur d'erreur

les estimateurs *a posteriori*.

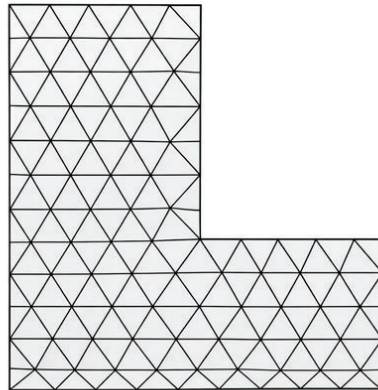
$$\|u_{app} - u_{modele}\| \leq \textit{Calculable}$$

Certification estimateur et indicateur d'erreur

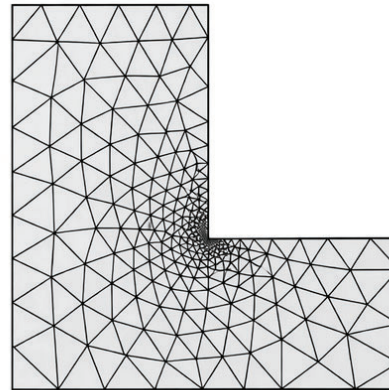
les estimateurs *a posteriori*.

$$\|u_{app} - u_{modele}\| \leq \textit{Calculable}$$

Maillage uniforme



Maillage raffiné aux coins



Réduction de complexité, concept et quelques exemples

Réduction de complexité, concept et quelques exemples

$$F(U, \mu) = 0$$

Réduction de complexité, concept et quelques exemples

$$F(U, \mu) = 0$$

L'idée de la réduction de complexité va être de chercher la solution d'un nouveau problème,

non pas from scratch,

mais comme combinaison de solutions qui auront été précédemment calculées

Réduction de complexité, concept et quelques exemples

$$F(U, \mu) = 0$$

L'idée de la réduction de complexité va être de chercher la solution d'un nouveau problème,

non pas from scratch,

mais comme combinaison de solutions qui auront été précédemment calculées

La méthode RB remonte à Noor, Peters, Porsching, Rheinboldt et Fink, au début des années 1980, voire avant.

Réduction de complexité, concept et quelques exemples

$$F(U, \mu) = 0$$

L'idée de la réduction de complexité va être de chercher la solution d'un nouveau problème,

non pas from scratch,

mais comme combinaison de solutions qui auront été précédemment calculées

Vient alors la notion de "online" "offline"

Réduction de complexité, concept et quelques exemples

offline

$$F(U, \mu) = 0$$

$$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{10}, \quad \longrightarrow \quad U(\mu_1), U(\mu_2), \dots, U(\mu_{10})$$

Réduction de complexité, concept et quelques exemples

offline

$$F(U, \mu) = 0$$

$$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{10}, \quad \longrightarrow \quad U(\mu_1), U(\mu_2), \dots, U(\mu_{10})$$

online

$$U(\mu) \simeq \alpha_1 U(\mu_1) + \alpha_2 U(\mu_2) + \dots + \alpha_{10} U(\mu_{10})$$

Réduction de complexité, concept et quelques exemples

offline

$$F(U, \mu) = 0$$

$$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{10}, \quad \longrightarrow \quad U(\mu_1), U(\mu_2), \dots, U(\mu_{10})$$

online

$$U(\mu) \simeq \alpha_1 U(\mu_1) + \alpha_2 U(\mu_2) + \dots + \alpha_{10} U(\mu_{10})$$

$$\|F(\sum_{i=1}^{10} \alpha_i U(\mu_i); \mu)\|$$

Réduction de complexité, concept et quelques exemples

offline

$$F(U, \mu) = 0$$

$$\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{10}, \quad \longrightarrow \quad U(\mu_1), U(\mu_2), \dots, U(\mu_{10})$$

online

$$U(\mu) \simeq \alpha_1 U(\mu_1) + \alpha_2 U(\mu_2) + \dots + \alpha_{10} U(\mu_{10})$$

$$\|F(\sum_{i=1}^{10} \alpha_i U(\mu_i); \mu)\|$$

erreur a posteriori

A REDUCED BASIS ELEMENT METHOD FOR COMPLEX FLOW SYSTEMS

A. Emil Løvgren , Yvon Maday and Einar M. Rønquist

European Conference on Computational Fluid Dynamics

ECCOMAS CFD 2006

P. Wesseling, E. Oñate and J. Périaux (Eds)

© TU Delft, The Netherlands, 2006

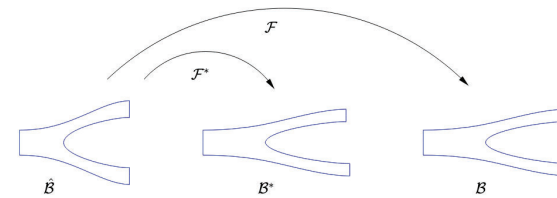
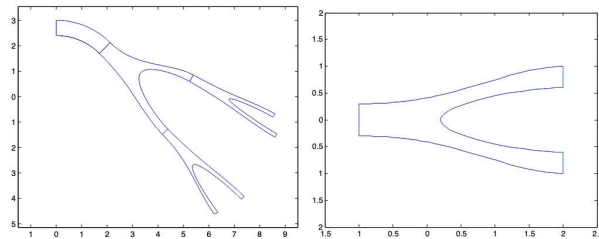


FIGURE 6. Different mappings for the bifurcation domains.

A REDUCED BASIS ELEMENT METHOD FOR COMPLEX FLOW SYSTEMS

A. Emil Løvgren , Yvon Maday and Einar M. Rønquist

European Conference on Computational Fluid Dynamics

ECCOMAS CFD 2006

P. Wesseling, E. Oñate and J. Périaux (Eds)

© TU Delft, The Netherlands, 2006

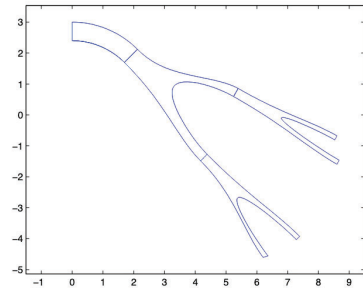


Figure 1: The computational domain Ω decomposed into building blocks.

N	N_1	N_2	$\ \mathbf{u}_N - \mathbf{u}\ _{H^1}$	$\ p_N - p\ _{L^2}$
36	9	9	$2.6 \cdot 10^{-3}$	$4.0 \cdot 10^{-1}$
44	11	11	$1.7 \cdot 10^{-3}$	$6.6 \cdot 10^{-2}$
52	13	13	$1.2 \cdot 10^{-3}$	$4.9 \cdot 10^{-2}$
65	15	15	$1.1 \cdot 10^{-3}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$
105	15	30	$4.2 \cdot 10^{-4}$	$6.3 \cdot 10^{-3}$

Table 2: The error in the reduced basis steady Stokes solution on a multi-block system corresponding to Figure 1. $N = N_1 + 3N_2$ is the total number of basis functions used. N_1 is the number of basis geometries used to generate the basis functions on the pipe block, N_2 is the number of basis functions used on the bifurcation blocks.

A REDUCED BASIS ELEMENT METHOD FOR COMPLEX FLOW SYSTEMS

A. Emil Løvgren , Yvon Maday and Einar M. Rønquist

European Conference on Computational Fluid Dynamics

ECCOMAS CFD 2006

P. Wesseling, E. Oñate and J. Périaux (Eds)

© TU Delft, The Netherlands, 2006

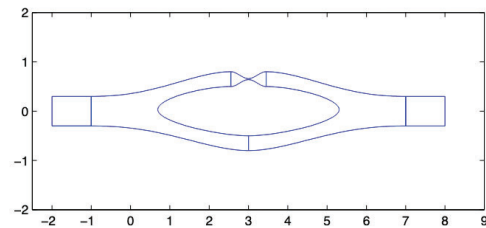


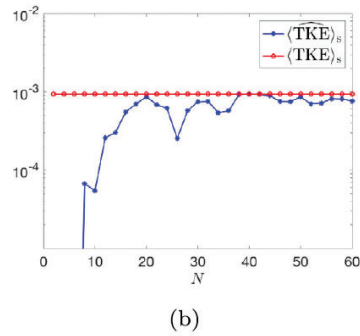
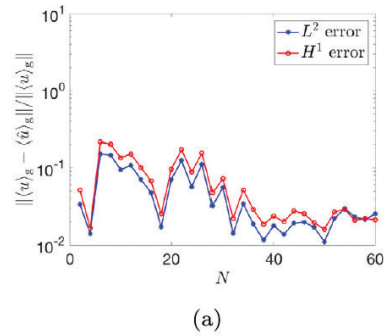
Figure 4: The bypass with three pipe blocks and two bifurcation blocks.

N	N_1	N_2	$\ \mathbf{u}_N - \mathbf{u}\ _{H^1}$	$\ p_N - p\ _{L^2}$
45	9	9	$9.3 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-1}$
55	11	11	$3.1 \cdot 10^{-3}$	$5.3 \cdot 10^{-1}$
65	13	13	$2.3 \cdot 10^{-3}$	$9.0 \cdot 10^{-2}$
75	15	15	$1.4 \cdot 10^{-3}$	$5.3 \cdot 10^{-2}$
105	15	30	$5.4 \cdot 10^{-4}$	$3.0 \cdot 10^{-2}$

Table 3: The error in the reduced basis steady Stokes solution on a multi-block bypass with three pipe blocks and two bifurcation blocks. $N = 3N_1 + 2N_2$ is the total number of basis functions used. N_1 is the number of basis geometries used to generate the basis functions on the pipe block, N_2 is the number of basis functions used on the bifurcation blocks.

A stabilized POD model for turbulent flows over a range of Reynolds numbers: Optimal parameter sampling and constrained projection

Lambert Fick^a, Yvon Maday^{b,c}, Anthony T. Patera^d, Tommaso Taddei^{b,*}



Convergence et préservation de l'énergie cinétique turbulente

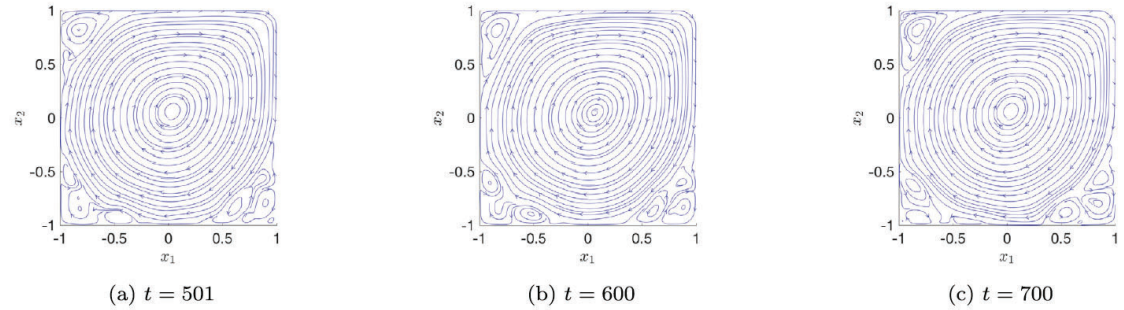


Fig. A.14. A lid-driven cavity problem. Velocity streamlines for $Re = 15000$.

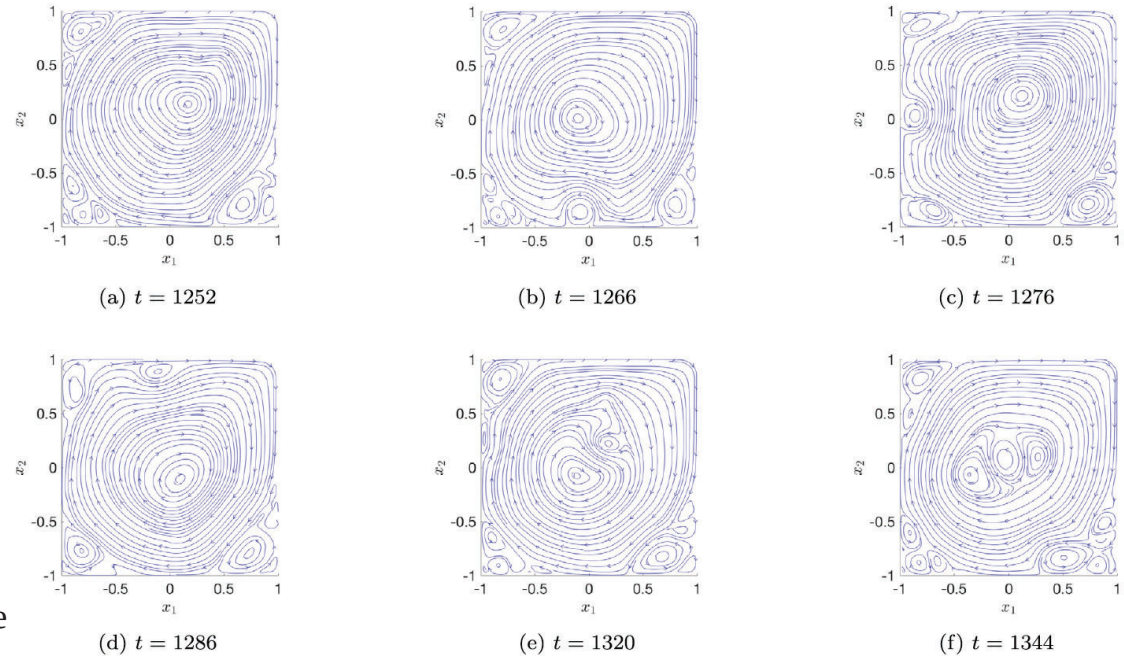


Fig. A.15. A lid-driven cavity problem. Velocity streamlines for $Re = 20000$ for several time steps.

Les données + les modèles pour suppléer aux erreurs

Les données + les modèles pour suppléer aux erreurs

modèle imparfait

données/mesures entachées d'erreur

Les données + les modèles pour suppléer aux erreurs

modèle imparfait

données/mesures entachées d'erreur

assimilation de données

Les données + les modèles pour suppléer aux erreurs

modèle imparfait

données/mesures entachées d'erreur

assimilation de données

Méthode EIM/ GEIM/PBDW

Les données + les modèles pour suppléer aux erreurs

modèle imparfait

données/mesures entachées d'erreur

assimilation de données

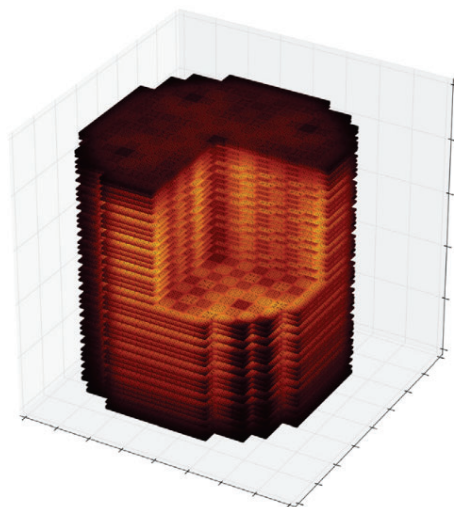
Méthode EIM/ GEIM/PBDW

Optimisation du placement des données et prise en compte d'un budget

Sensor placement in nuclear reactors based on the generalized empirical interpolation method



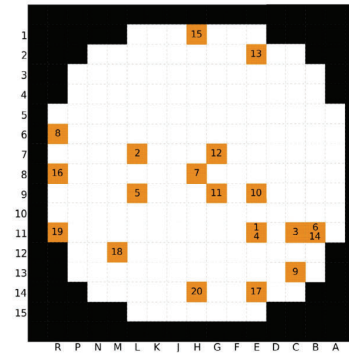
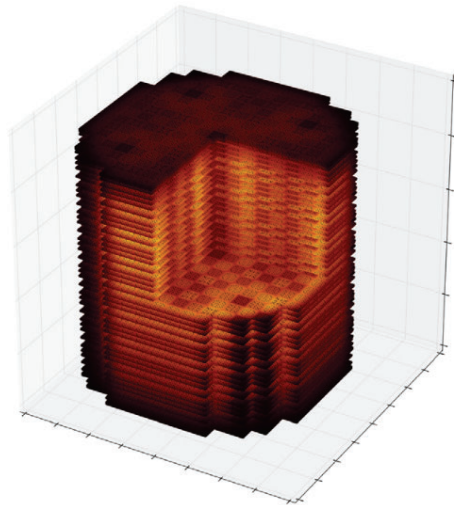
J.-P. Argaud^a, B. Bouriquet^a, F. de Caso^a, H. Gong^{a,b,*}, Y. Maday^{b,c,d}, O. Mula^e



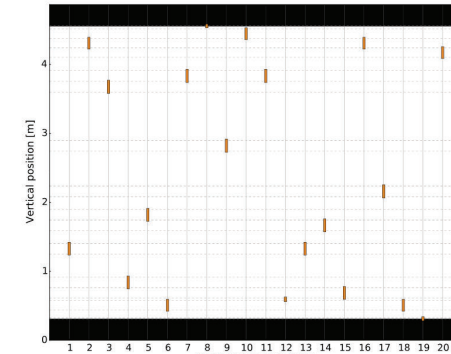
Exemple de répartition 3D de la puissance sur le cœur dans un réacteur réaliste de 1 450 MWe chez EDF.

Sensor placement in nuclear reactors based on the generalized empirical interpolation method

J.-P. Argaud^a, B. Bouriquet^a, F. de Caso^a, H. Gong^{a,b,*}, Y. Maday^{b,c,d}, O. Mula^e



(a) Radial

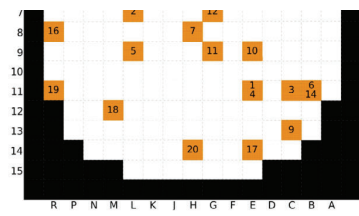
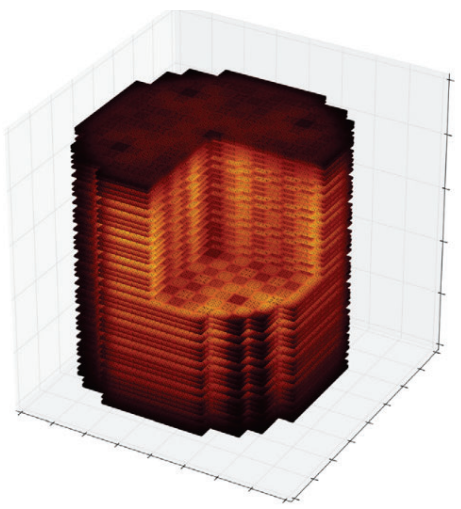


(b) Axial

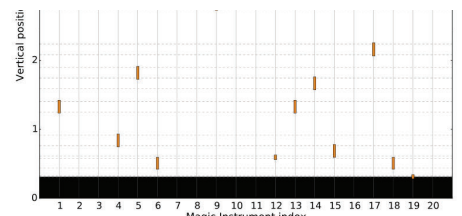
Les 20 premiers emplacements de capteurs, un réacteur réaliste de 1450 MWe.

Exemple de répartition 3D de la puissance sur le cœur dans un réacteur réaliste de 1 450 MWe chez EDF.

Items	Off-line	On-line
One snapshot calculation	46	
Prepare $\mathcal{M}^{(training)}$, 1000 snapshots	46110	
Select 50 basis functions and sensors with GEIM greedy algorithm	20328	
Field reconstruction with 5 basis functions		0.05
Field reconstruction with 15 basis functions		0.25



(a) Radial



(b) Axial

Les 20 premiers emplacements de capteurs, un réacteur réaliste de 1450 MWe.

Exemple de répartition 3D de la puissance sur le cœur dans un réacteur réaliste de 1 450 MWe chez EDF.

une modélisation qui devrait vous parler

Modèles compartimentaux des épidémies

Modele SIR : proposé par Kermack and McKendrick en 1927.



On doit expliquer comment les S sont contaminés

Ils sont contaminés en rencontrant des I

Plus il y a de S plus il y a de contacts et plus il y a de I plus il y a de contact aussi donc un premier

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta}{N}SI$$

ici N représente le nombre total d'individus : $N = S + I + R$

Modèles compartimentaux des épidémies

Modele SIR : proposé par Kermack and McKendrick en 1927.



On doit expliquer comment les S sont contaminés

Ils sont contaminés en rencontrant des I

Modèles compartimentaux des épidémies

Modele SIR : proposé par Kermack and McKendrick en 1927.



$$\frac{dS}{dt} = -\frac{\beta}{N}SI$$

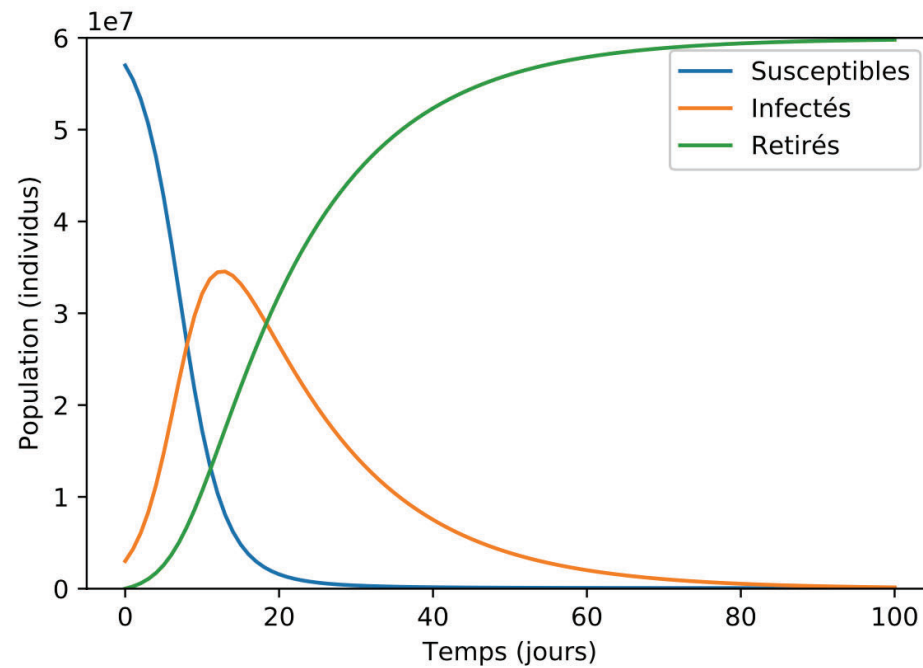
$$\frac{dI}{dt} = \frac{\beta}{N}SI - \gamma I$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I$$

Modèles compartimentaux des épidémies

Modele SIR : proposé par Kermack and McKendrick en 1927.

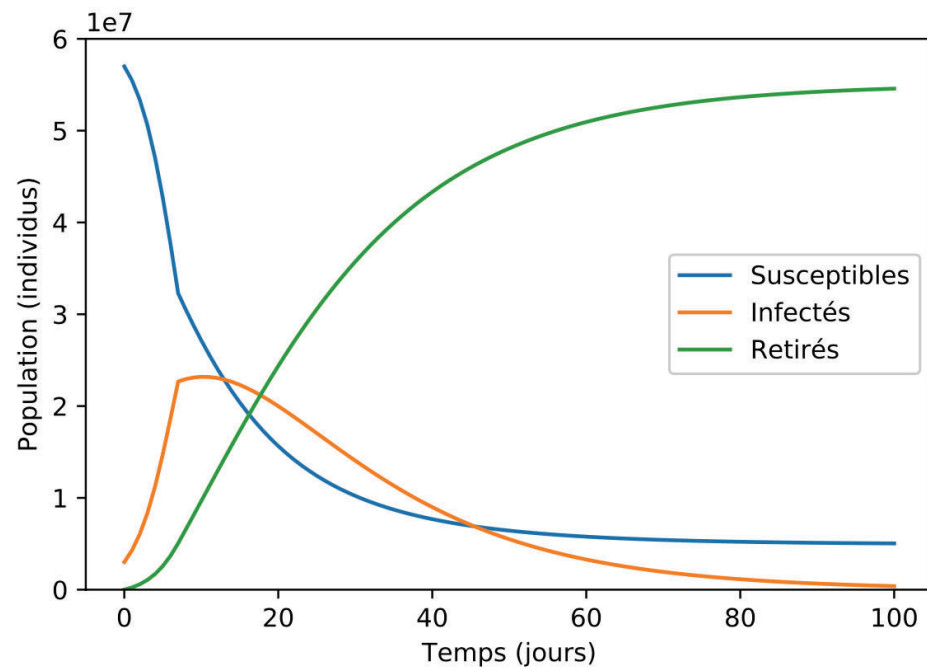
Voilà ce qui pouvait être obtenu en France, aux premiers jours de l'épidémie de Sars CoV 2 avec des paramètres $\beta = 0.45$ et $\gamma = 1/15$



Modèles compartimentaux des épidémies

Modele SIR : proposé par Kermack and McKendrick en 1927.

Et voilà environ ce qui s'est passé en changeant la valeur de β de 0.45 à 0.15, reflétant une diminution des rencontres, obtenue par le confinement



Modèles compartimentaux des épidémies

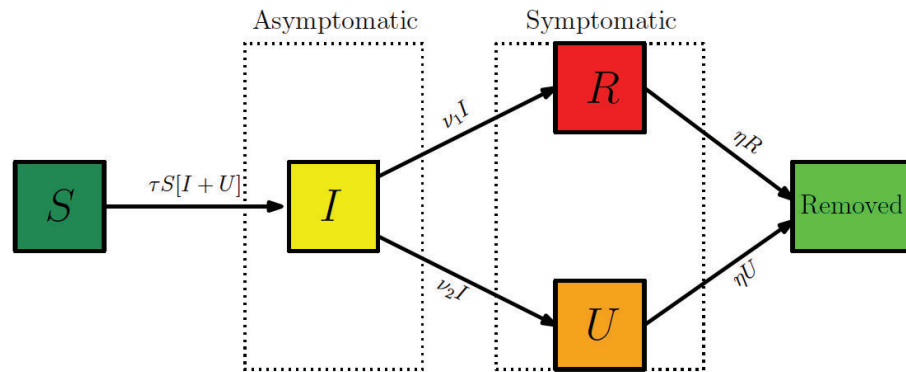


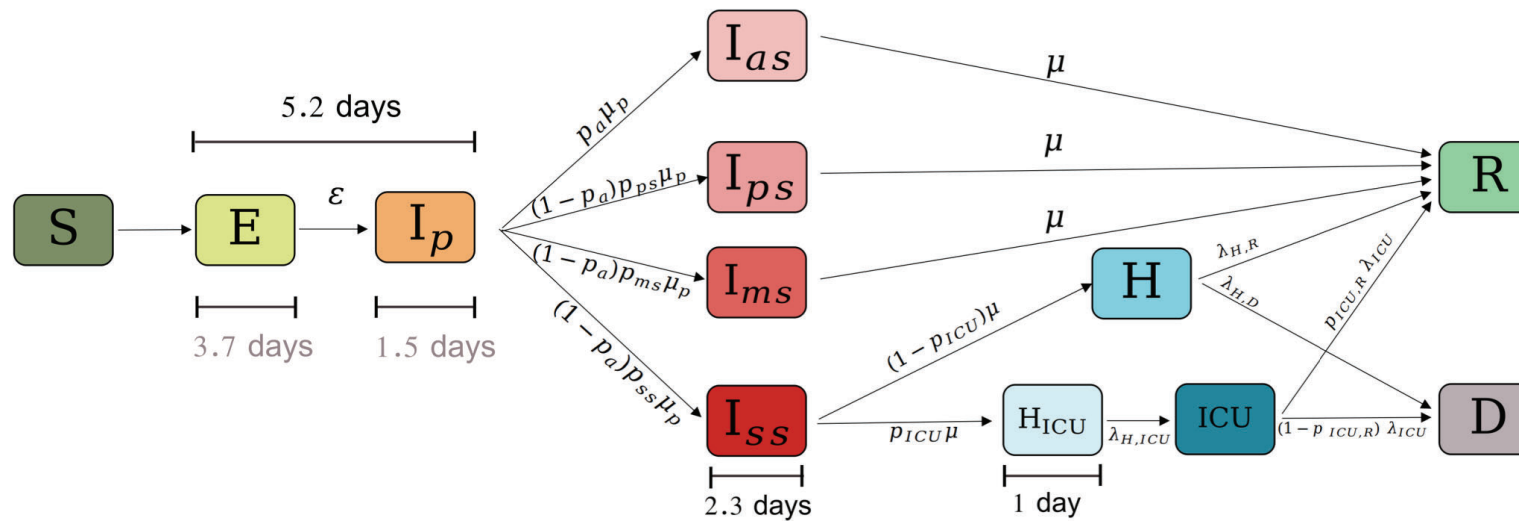
Figure: Compartments and flow chart of the model.

P. Magal and G. Webb, The parameter identification problem for SIR epidemic models: Identifying Unreported Cases, J. Math. Biol. (2018).

A. Ducrot, P. Magal, T. Nguyen, G. Webb, Identifying the Number of Unreported Cases in SIR Epidemic Models. Mathematical Medicine and Biology, (2019)

$$\begin{cases} S'(t) = -\tau S(t)[I(t) + U(t)], \\ I'(t) = \tau S(t)[I(t) + U(t)] - \nu I(t), \\ R'(t) = \nu_1 I(t) - \eta R(t), \\ U'(t) = \nu_2 I(t) - \eta U(t). \end{cases}$$

Modèles compartimentaux des épidémies



Expected impact of reopening schools after lockdown on COVID-19 epidemic in Île-de-France, Laura Di Domenico , Giulia Pullano , Chiara E. Sabbatini , Pierre-Yves Boëlle , Vittoria Colizza

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Un modèle SIR avec 2 coefficients $\beta(t)$ et $\gamma(t)$ qui dépendent du temps



Bakhta, A., Boiveau, T., Maday, Y., & Mula, O. (2021).
Epidemiological Forecasting with Model Reduction of Compartmental Models. Application to the COVID-19 Pandemic. *Biology*, 10(1), 22.

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Un modèle SIR avec 2 coefficients $\beta(t)$ et $\gamma(t)$ qui dépendent du temps

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt}(t) &= -\frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \\ \frac{dI}{dt}(t) &= \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} - \gamma(t)I(t) \\ \frac{dR}{dt}(t) &= \gamma(t)I(t)\end{aligned}$$



Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Un modèle SIR avec 2 coefficients $\beta(t)$ et $\gamma(t)$ qui dépendent du temps

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt}(t) &= -\frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \\ \frac{dI}{dt}(t) &= \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} - \gamma(t)I(t) \\ \frac{dR}{dt}(t) &= \gamma(t)I(t)\end{aligned}$$

et chaque jour on calcule les coefficients pour représenter au mieux la progression de l'épidémie

$$\min_{\beta, \gamma} \{ \|I_{data} - I_{\beta, \gamma}\| + \|R_{data} - R_{\beta, \gamma}\| \}$$

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Théorème : Soit N , la population totale, et T une durée d'observation donnée. Pour toute évolution notée $S_{data}, I_{data}, R_{data}$,

Si :

- en tout temps d'observation : $S_{data}(t) + I_{data}(t) + R_{data}(t) = N$
- $S_{data}(t)$ est décroissante
- $R_{data}(t)$ est croissante

Alors

Il existe un unique minimiseur au problème $\min_{\beta, \gamma} \{ \|I_{data} - I_{\beta, \gamma}\| + \|R_{data} - R_{\beta, \gamma}\| \}$

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Théorème : Soit N , la population totale, et T une durée d'observation donnée. Pour toute évolution notée $S_{data}, I_{data}, R_{data}$,

Si :

- en tout temps d'observation : $S_{data}(t) + I_{data}(t) + R_{data}(t) = N$
- $S_{data}(t)$ est décroissante
- $R_{data}(t)$ est croissante

Alors

Il existe un unique minimiseur au problème

$$\beta(t) = -\frac{N}{I(t)S(t)} \frac{dS(t)}{dt}$$
$$\gamma(t) = \frac{1}{I(t)} \left[\frac{dI}{dt}(t) - \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \right]$$

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt}(t) &= -\frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \\ \frac{dI}{dt}(t) &= \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} - \gamma(t)I(t) \\ \frac{dR}{dt}(t) &= \gamma(t)I(t)\end{aligned}$$

Pour toute évolution notée $S_{data}, I_{data}, R_{data}$,

$$\begin{aligned}\beta(t) &= -\frac{N}{I(t)S(t)} \frac{dS(t)}{dt} \\ \gamma(t) &= \frac{1}{I(t)} \left[\frac{dI}{dt}(t) - \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \right]\end{aligned}$$

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Pour toute évolution notée $S_{data}, I_{data}, R_{data}$,

$$\begin{aligned}\beta(t) &= -\frac{N}{I(t)S(t)} \frac{dS(t)}{dt} \\ \gamma(t) &= \frac{1}{I(t)} \left[\frac{dI}{dt}(t) - \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \right]\end{aligned}$$

Bakhta, A., Boiveau, T., Maday, Y., & Mula, O. (2021).
Epidemiological Forecasting with Model Reduction of Compartmental Models. Application to the COVID-19 Pandemic. *Biology*, 10(1), 22.

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Pour toute évolution notée $S_{data}, I_{data}, R_{data}$,

On a donc simulé tout plein de modèles correspondant aux propositions de Magal et Collizza

$$\begin{aligned}\beta(t) &= -\frac{N}{I(t)S(t)} \frac{dS(t)}{dt} \\ \gamma(t) &= \frac{1}{I(t)} \left[\frac{dI}{dt}(t) - \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \right]\end{aligned}$$

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Pour toute évolution notée $S_{data}, I_{data}, R_{data}$,

On a donc simulé tout plein de modèles correspondant aux propositions de Magal et Collizza

On calcule ces valeurs associées pour toutes ces épidémies « in silico »

$$\beta(t) = -\frac{N}{I(t)S(t)} \frac{dS(t)}{dt}$$
$$\gamma(t) = \frac{1}{I(t)} \left[\frac{dI}{dt}(t) - \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \right]$$

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Pour toute évolution notée $S_{data}, I_{data}, R_{data}$,

On a donc simulé tout plein de modèles correspondant aux propositions de Magal et Collizza

On calcule ces valeurs associées pour toutes ces épidémies « in silico »

et déduit des courbes, dépendant des paramètres de ces modèles

$$\mathcal{S} = \{\beta(t; \mu), \gamma(t; \mu)\}$$

$$\begin{aligned}\beta(t) &= -\frac{N}{I(t)S(t)} \frac{dS(t)}{dt} \\ \gamma(t) &= \frac{1}{I(t)} \left[\frac{dI}{dt}(t) - \frac{\beta(t)I(t)S(t)}{N} \right]\end{aligned}$$

Modèles compartimentaux des épidémies

Avec Olga Mula, Thomas Boiveau, Athmane Bakhta, nous avons proposé une alternative

Pour toute évolution notée $S_{data}, I_{data}, R_{data}$,

On a donc simulé tout plein de modèles correspondant aux propositions de Magal et Collizza

et déduit des courbes, dépendant des paramètres de ces modèles

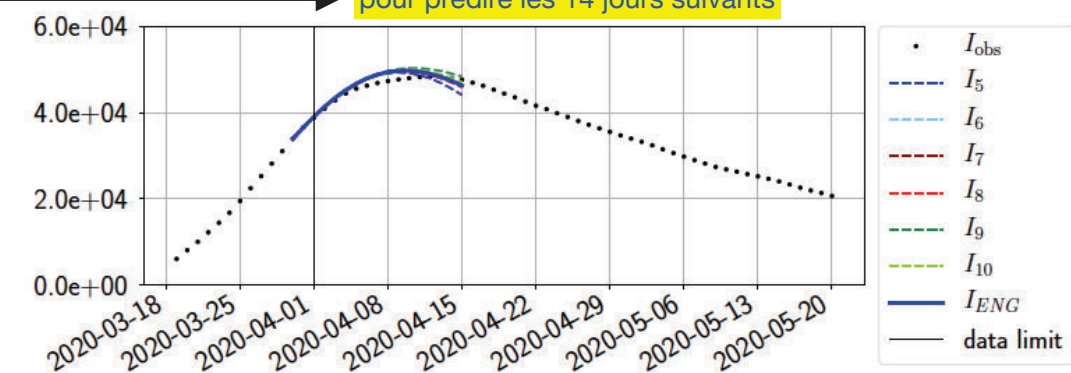
$$\mathcal{S} = \{\beta(t; \mu), \gamma(t; \mu)\}$$

et enfin condensé la complexité

$$\mathcal{S} = \{\beta(t; \mu), \gamma(t; \mu)\} \simeq \text{Span}\{\beta_i, \gamma_i, i = 1, \dots, N\}$$

on n'utilise que ces données

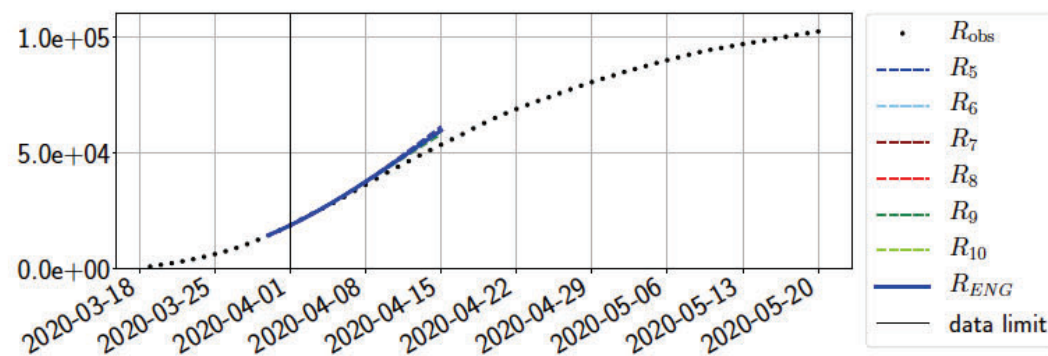
pour prédire les 14 jours suivants



(c) Infected

on n'utilise que ces données

pour prédire les 14 jours suivants

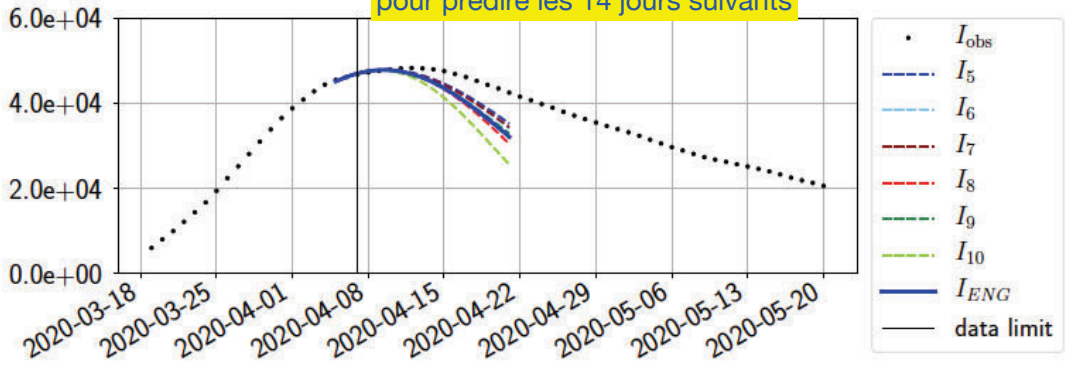


(d) Removed

Prévision au 1 Avril sur 14 jours/ comparaison avec les données Santé Publique France

on n'utilise que ces données

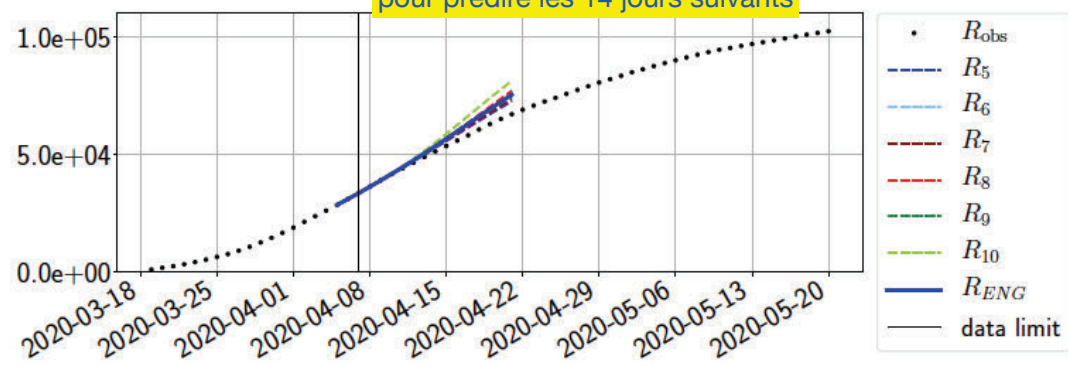
pour prédire les 14 jours suivants



(c) Infected

on n'utilise que ces données

pour prédire les 14 jours suivants

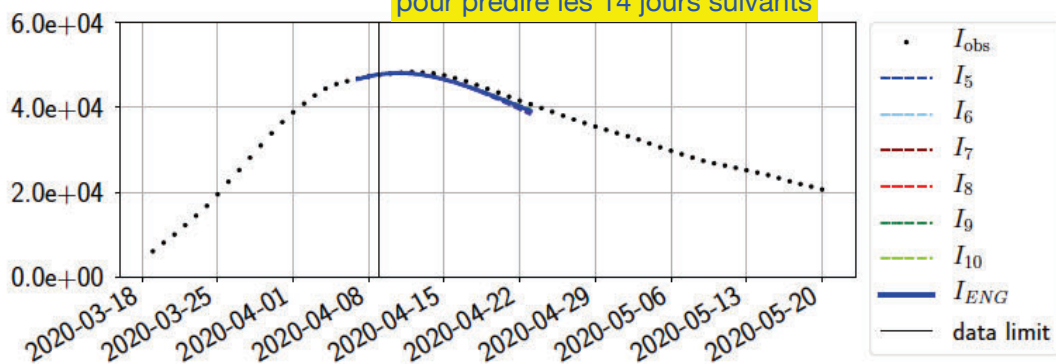


(d) Removed

Prévision au 7 avril sur 14 jours/ comparaison avec les données Santé Publique France

on n'utilise que ces données

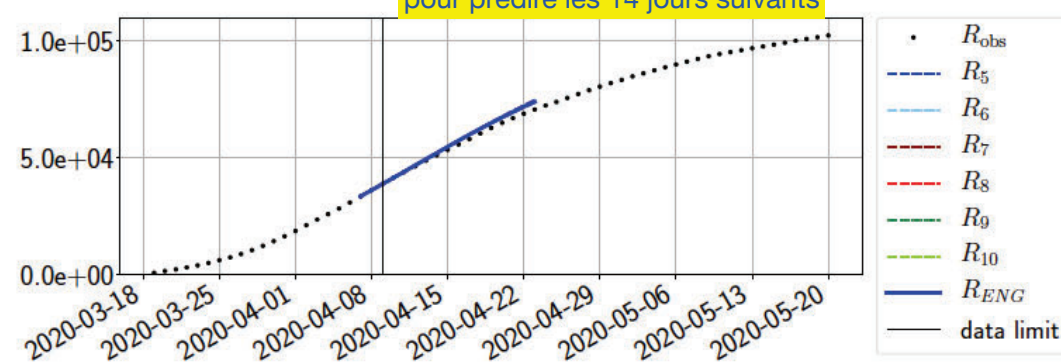
pour prédire les 14 jours suivants



(c) Infected

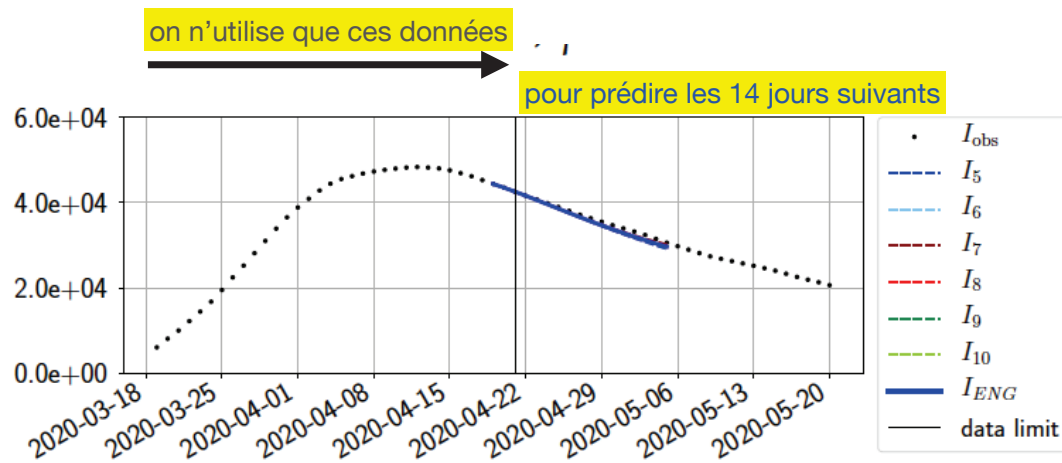
on n'utilise que ces données

pour prédire les 14 jours suivants

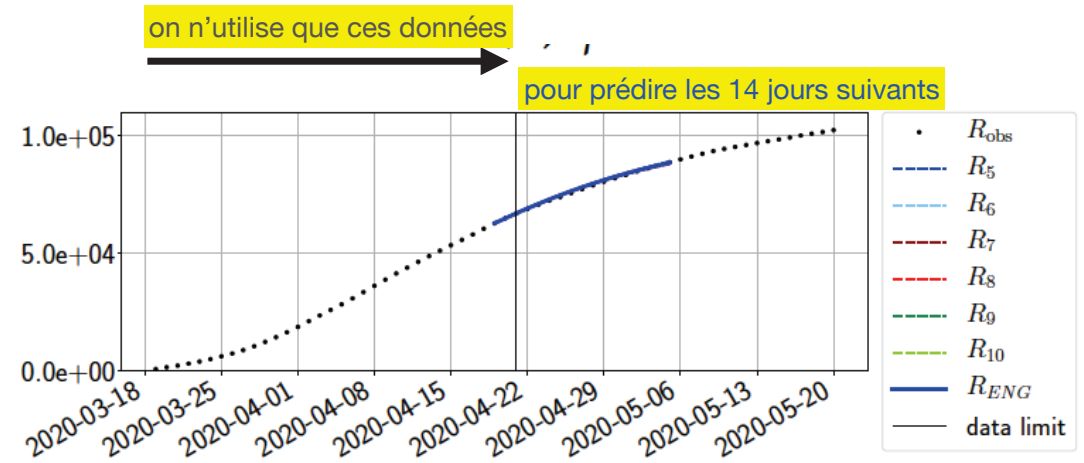


(d) Removed

Prévision au 9 avril sur 14 jours/ comparaison avec les données Santé Publique France



(c) Infected

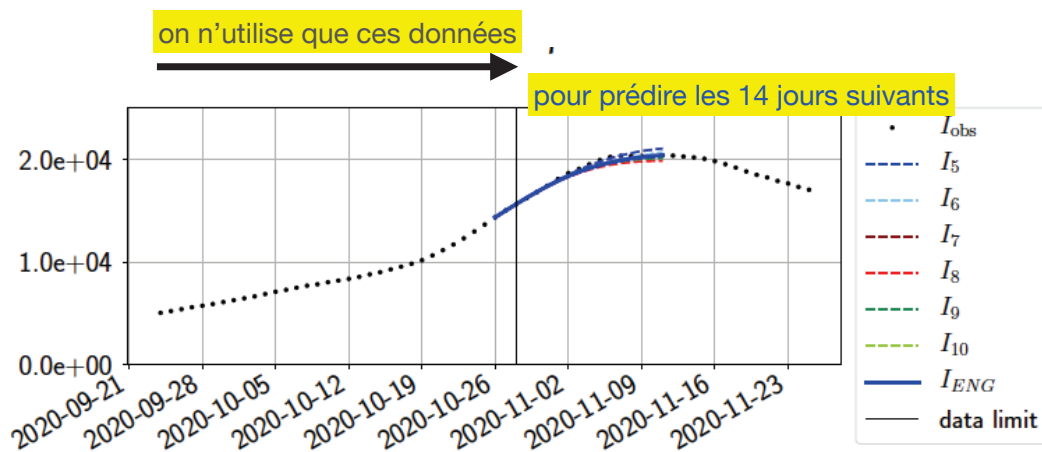


(d) Removed

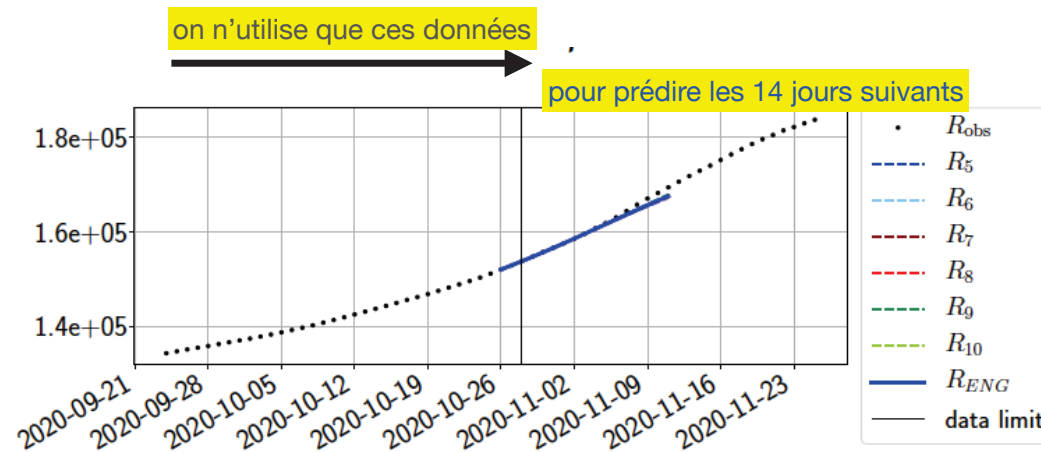
Prévision au 21 avril sur 14 jours/ comparaison avec les données Santé Publique France

Seconde vague

on connaît la suite mais on ne l'utilise pas



(c) Infected



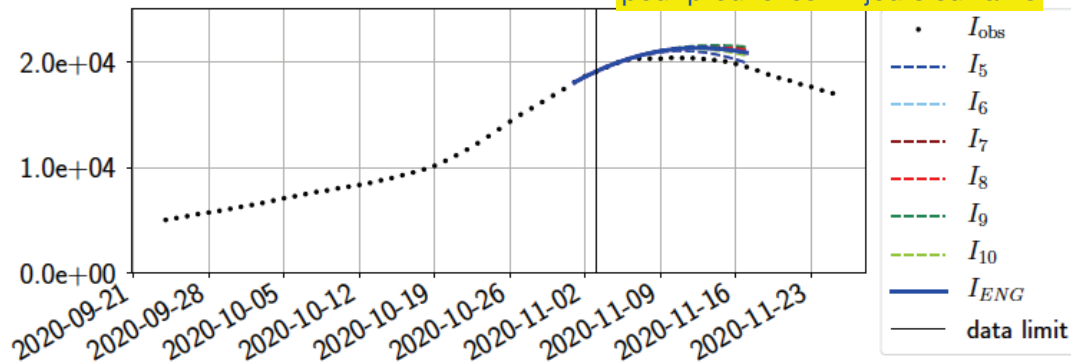
(d) Removed

Prévision au 28 Octobre sur 14 jours/ comparaison avec les données Santé Publique France

on n'utilise que ces données



pour prédire les 14 jours suivants

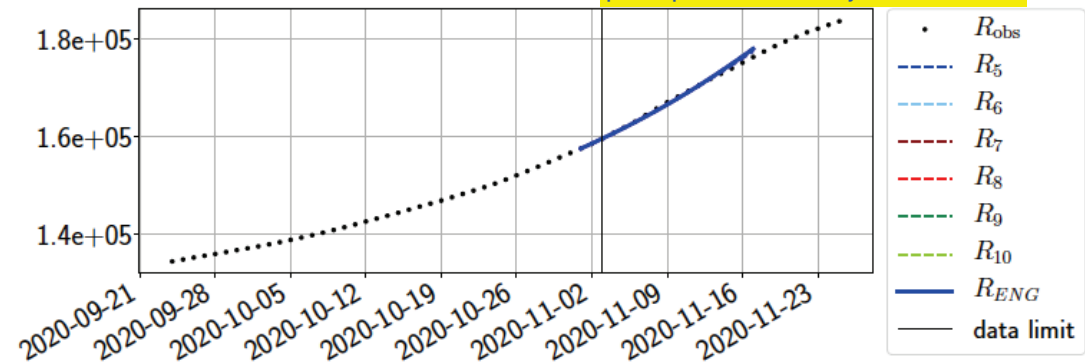


(c) Infected

on n'utilise que ces données



pour prédire les 14 jours suivants



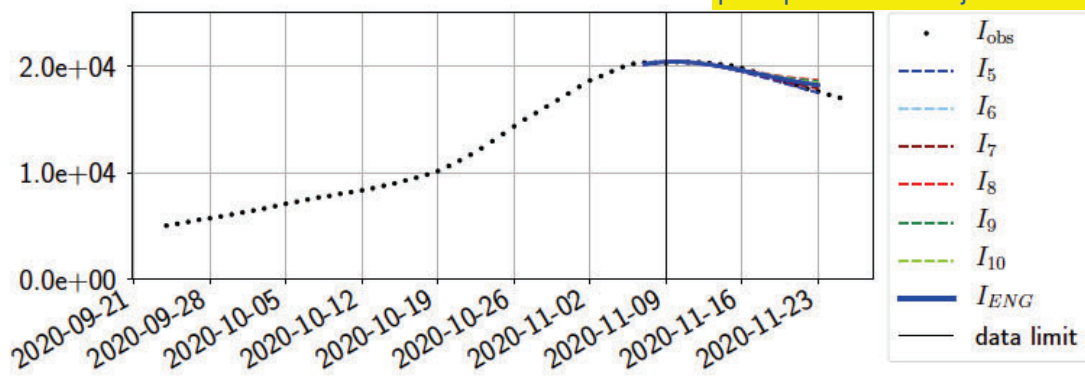
(d) Removed

Prévision au 3 Novembre sur 14 jours/ comparaison avec les données Santé Publique France

on n'utilise que ces données



pour prédire les 14 jours suivants

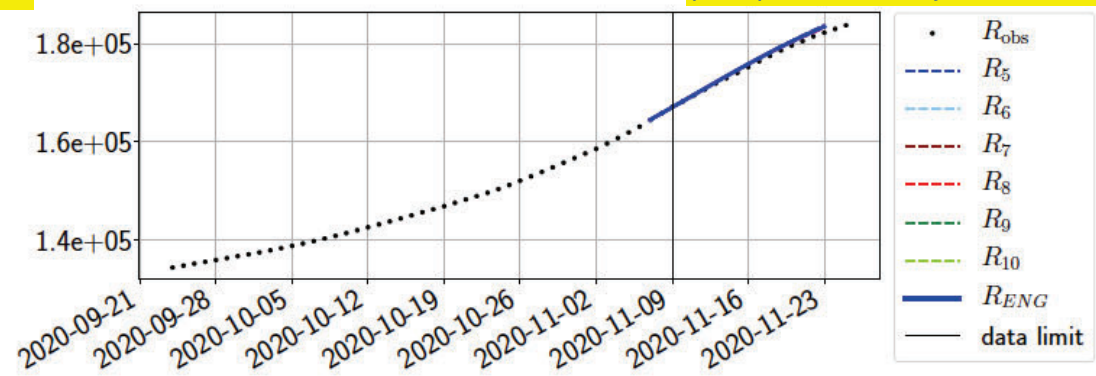


(c) Infected

on n'utilise que ces données



pour prédire les 14 jours suivants



(d) Removed

Prévision au 9 Novembre sur 14 jours/ comparaison avec les données Santé Publique France

Accès aux données

La méthode **SCOU** (**S**moother adapted to **C**ensored data with **O**utliers) propose un cadre statistique robuste pour la rectification de mesures longitudinales bruitées dans les eaux usées. Elle renouvelle l'analyse de données expérimentales en apportant une précision que les approches classiques laissaient jusque-là hors de portée.

The Obépine project

Wastewater-based Epidemiology

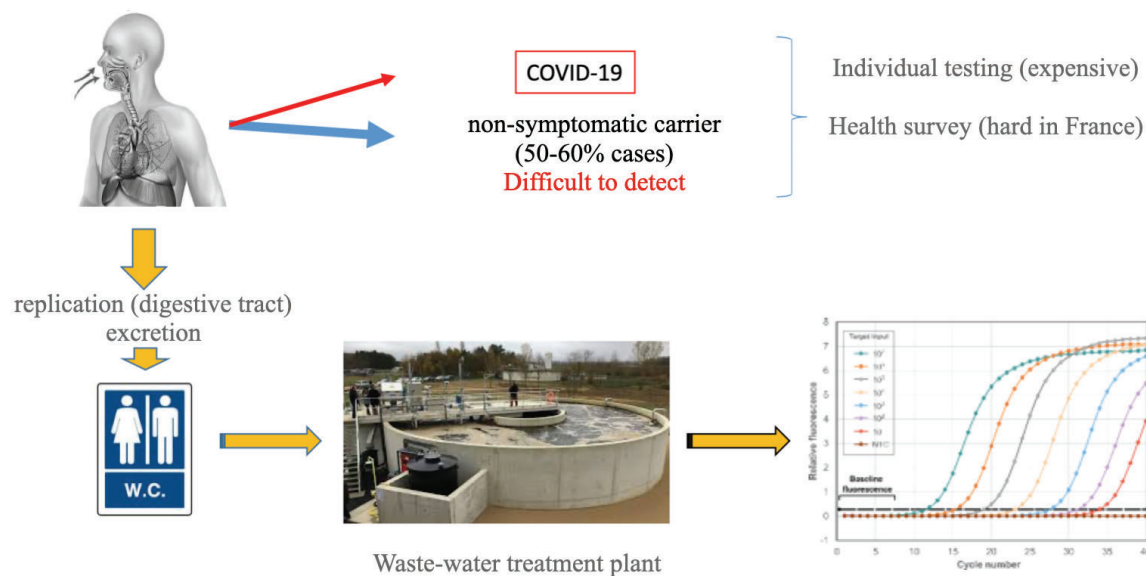


Environment International
Volume 158, January 2022, 106998



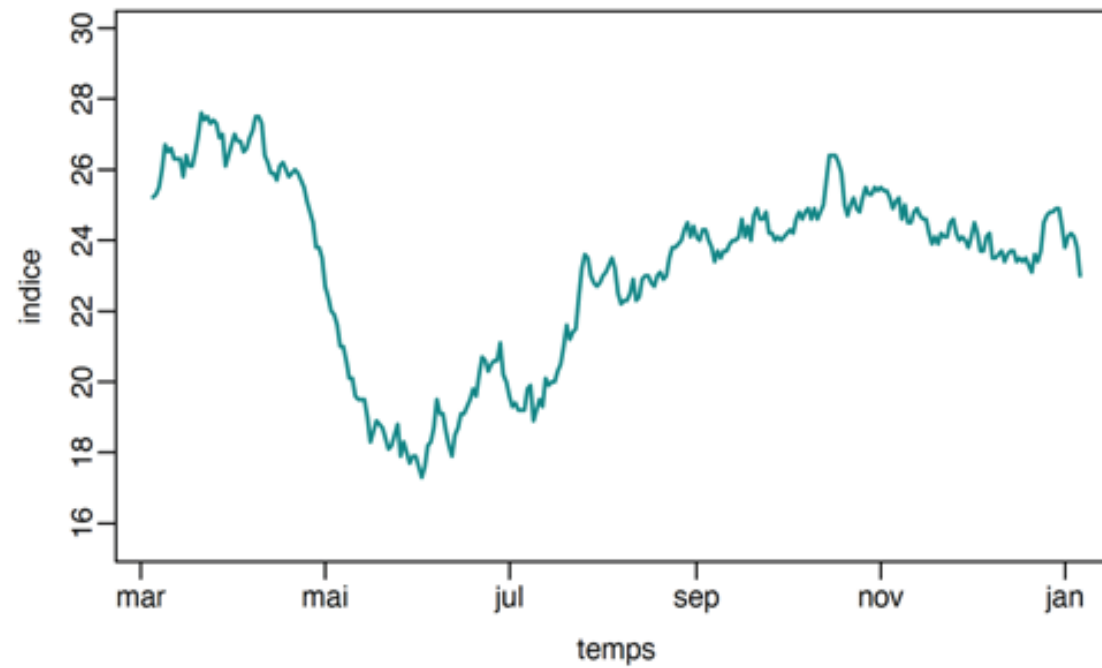
A nationwide indicator to smooth and normalize heterogeneous SARS-CoV-2 RNA data in wastewater

Nicolas Cluzel ^a, Marie Courbariaux ^a, Siyun Wang ^a, Laurent Moulin ^b, Sébastien Wurtzer ^b, Isabelle Bertrand ^c, Karine Laurent ^a, Patrick Monfort ^d, Christophe Gantzer ^c, Soizick Le Guyader ^e, Mickaël Boni ^f, Jean-Marie Mouchel ^{g,1}, Vincent Maréchal ^{h,1}, Grégory Nuel ^{i,1}, Yvon Maday ^{j,k,1}
¹ Obépine consortium ²



Evolution de la détection du virus de SARS CoV 2 dans les eaux usées

True values

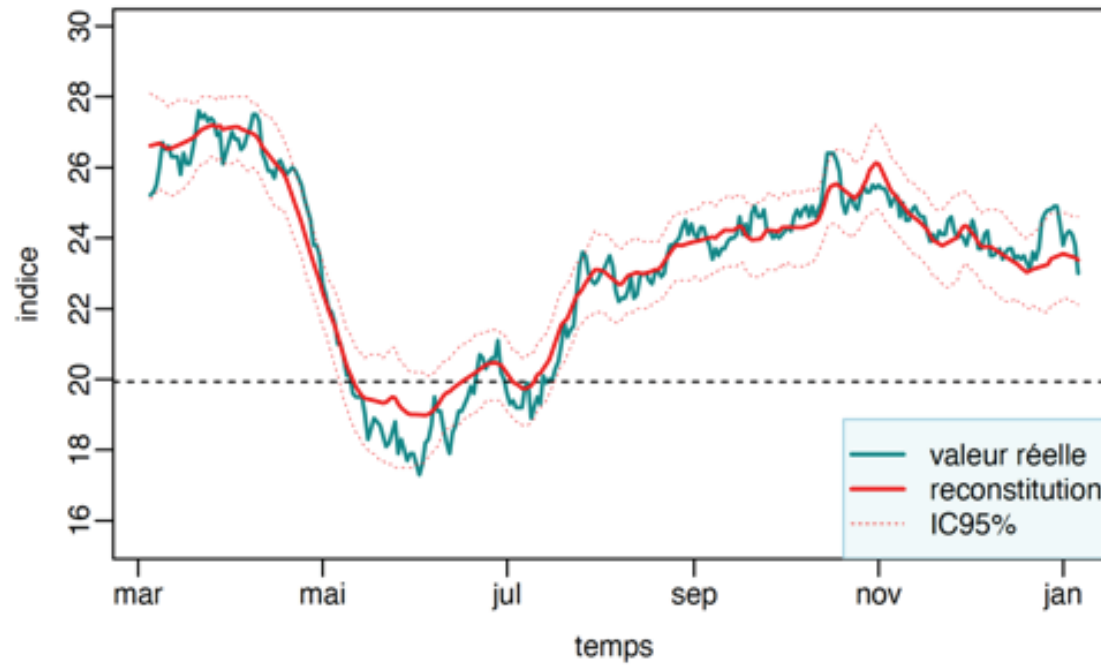


1 Marie Courbariaux et al. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 8, 2022.

2 Nicolas Cluzel et al. *Environment International*, 158 :106998, 2022.

Evolution de la détection du virus de SARS CoV 2 dans les eaux usées

Treatment with outliers and LOD

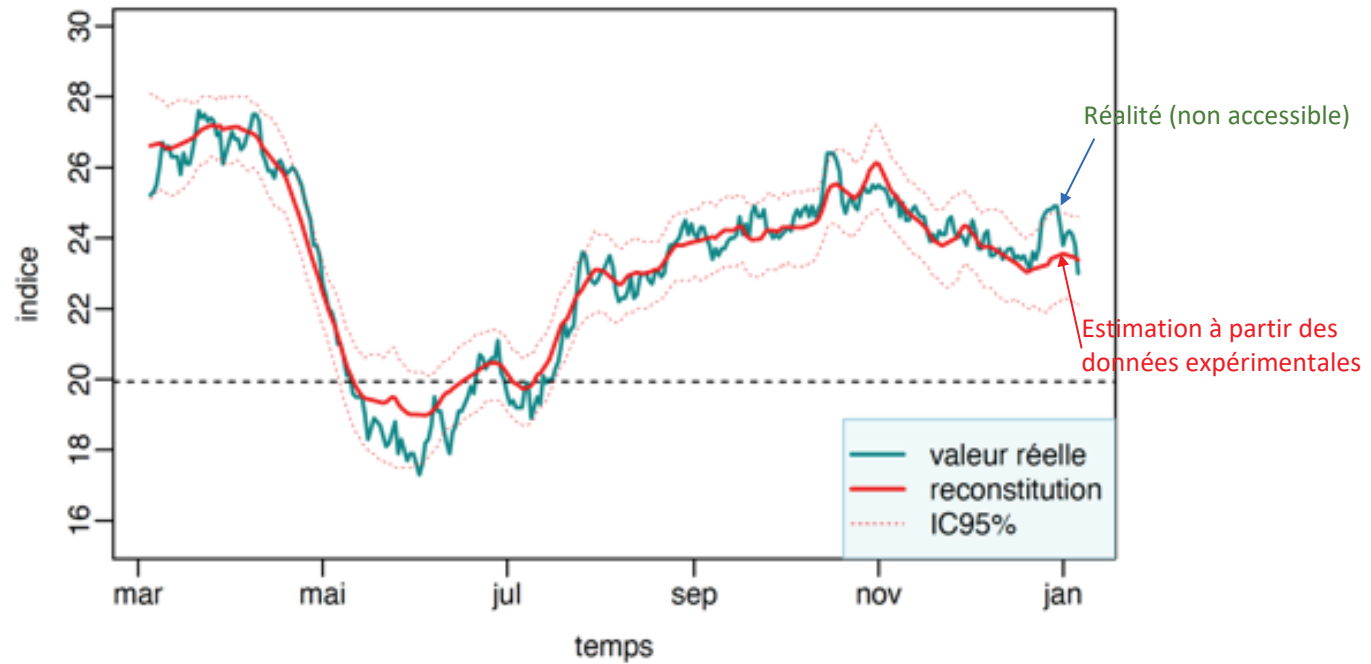


1 Marie Courbariaux et al. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 8, 2022.

2 Nicolas Cluzel et al. *Environment International*, 158 :106998, 2022.

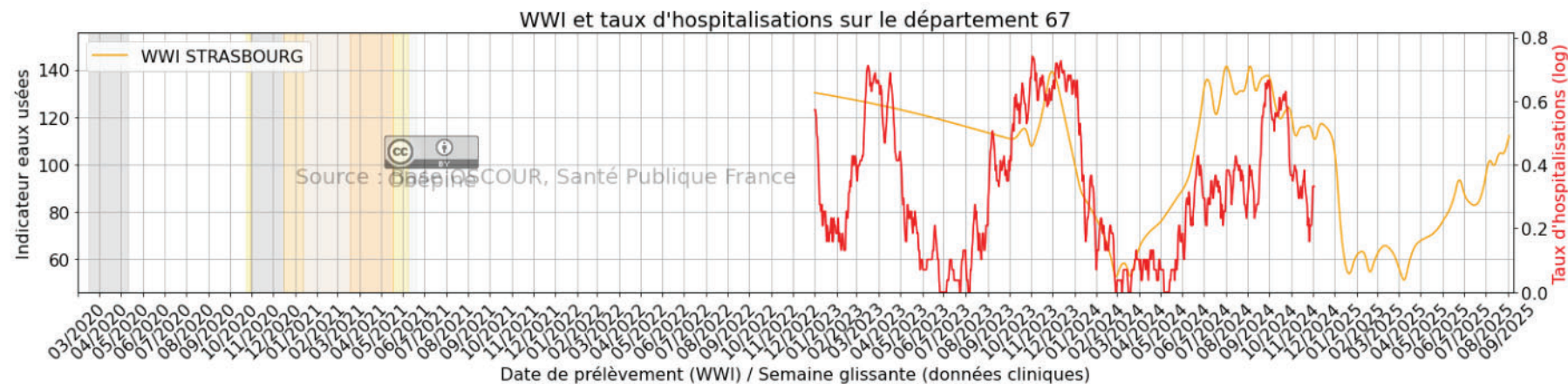
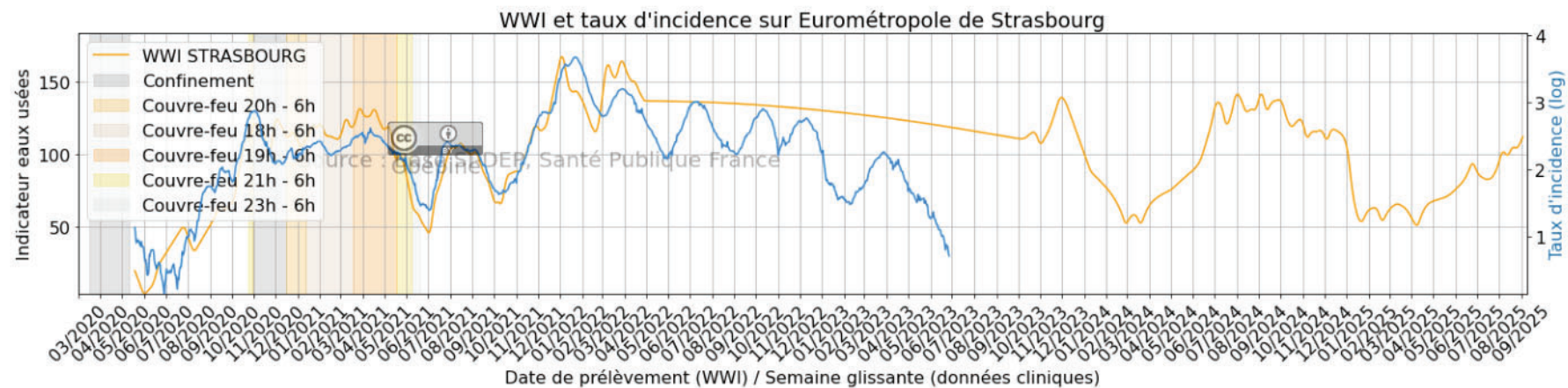
Evolution de la détection du virus de SARS CoV 2 dans les eaux usées

Treatment with outliers and LOD



1 Marie Courbariaux et al. *Frontiers in Applied Mathematics and Statistics*, 8, 2022.

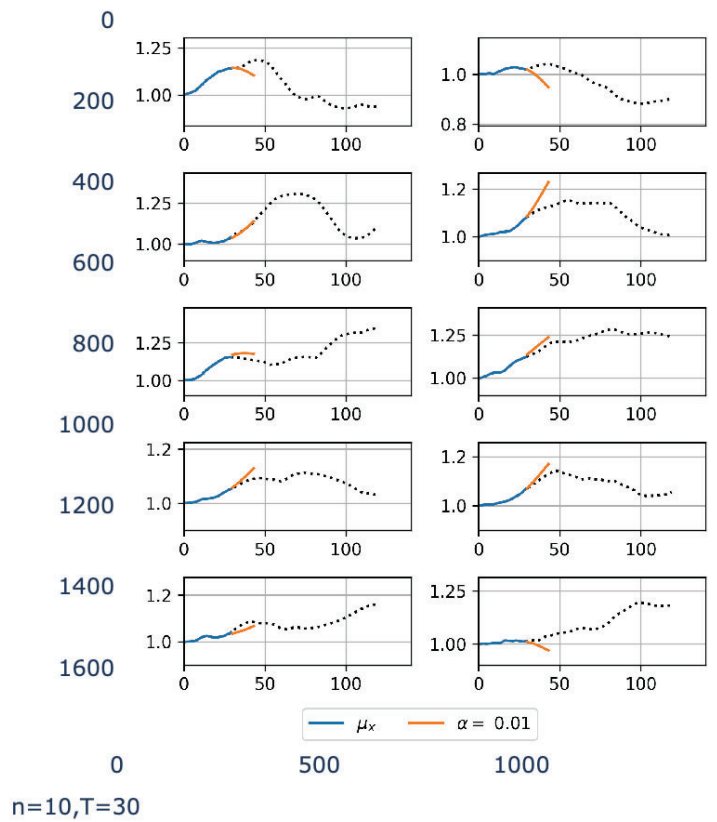
2 Nicolas Cluzel et al. *Environment International*, 158 :106998, 2022.



Accès aux données

Accès aux données

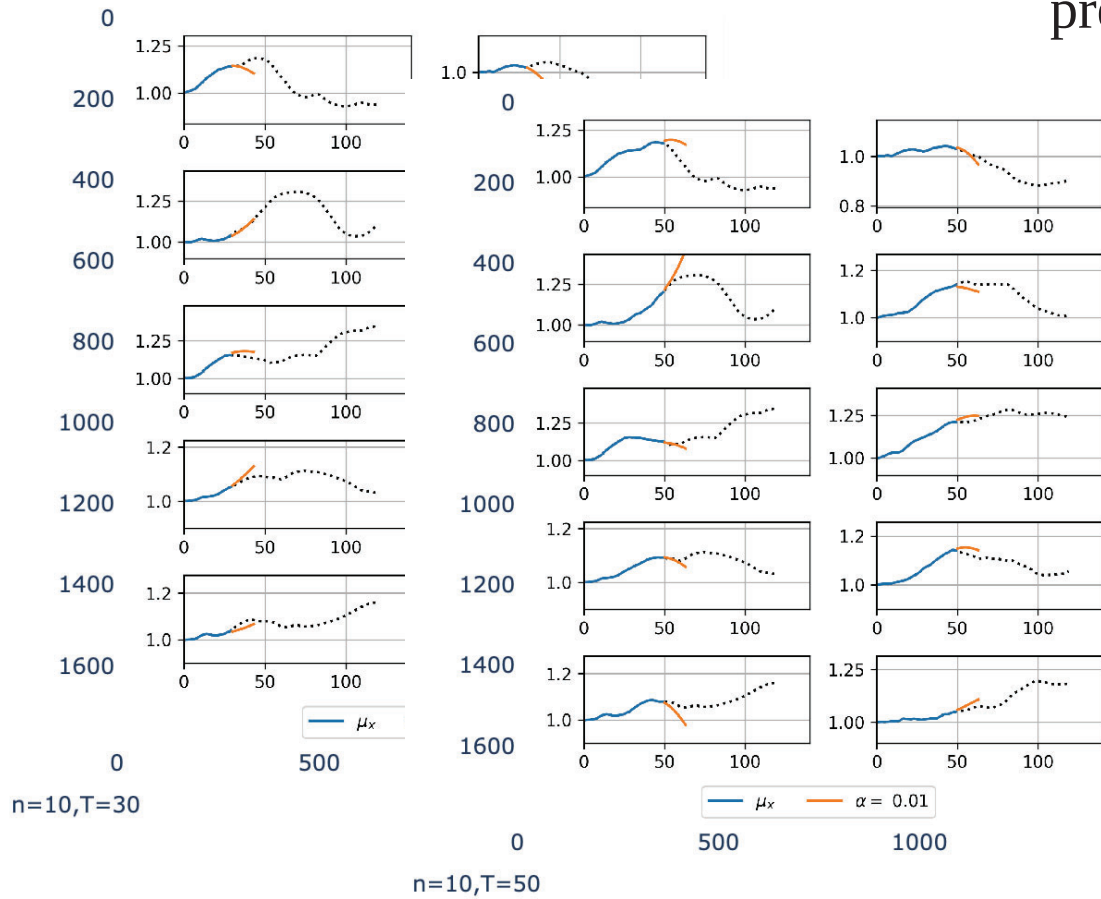
prédiction à partir des données accumulées



en cours avec Nicolas CLUZEL et Silouane DE REBOUL

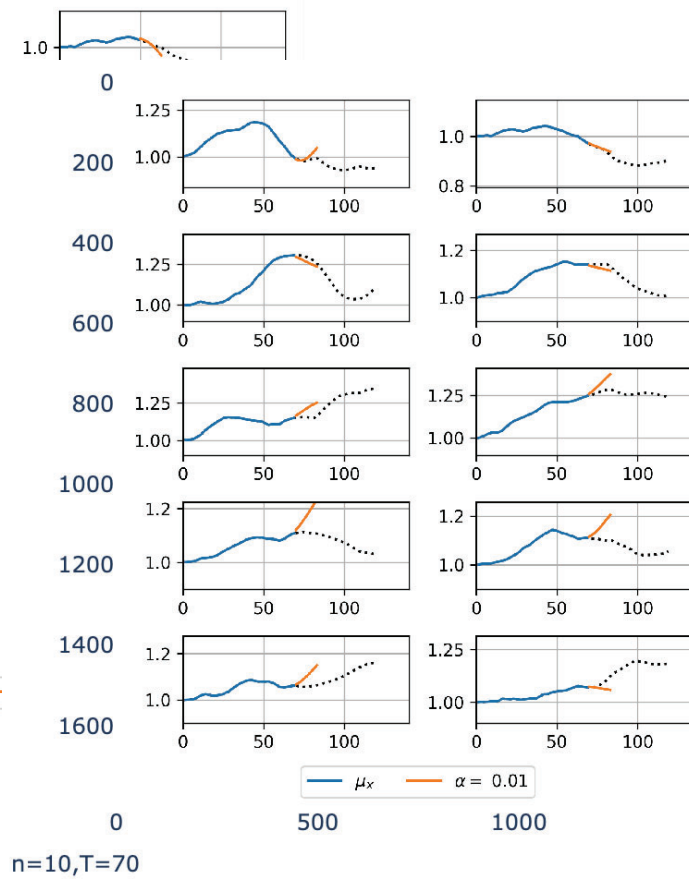
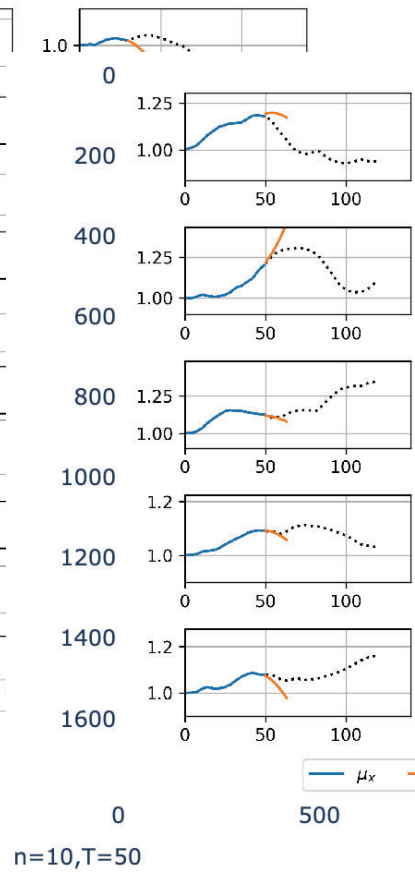
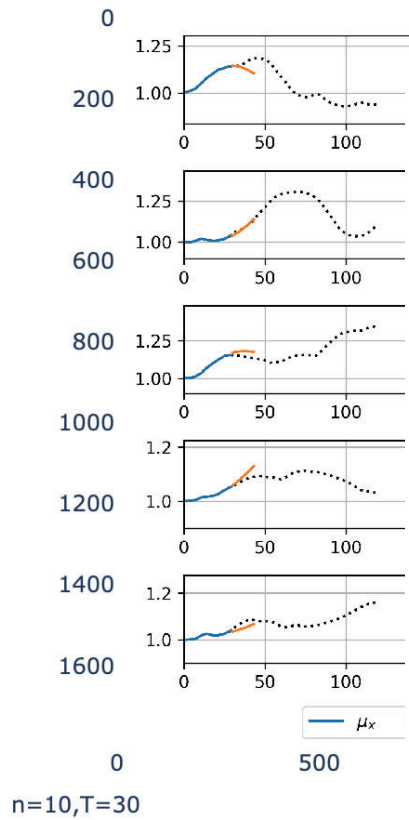
Accès aux données

prédiction à partir des données accumulées



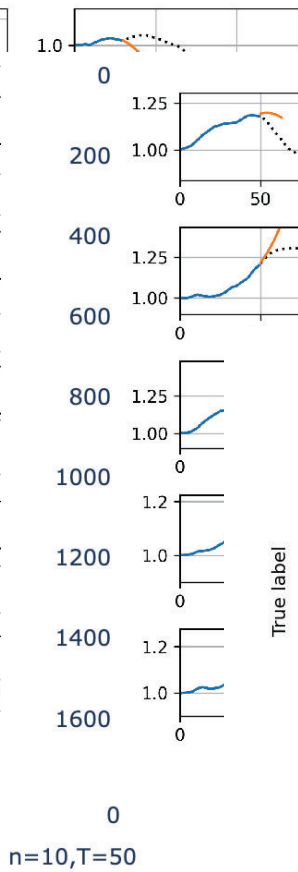
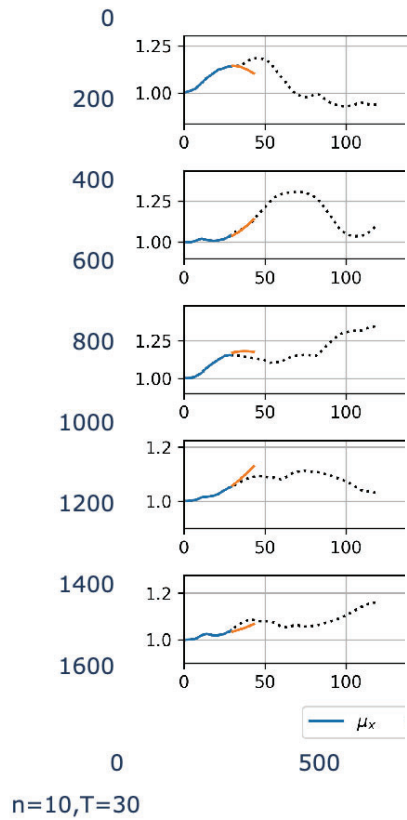
Accès aux données

prédiction à partir des données accumulées

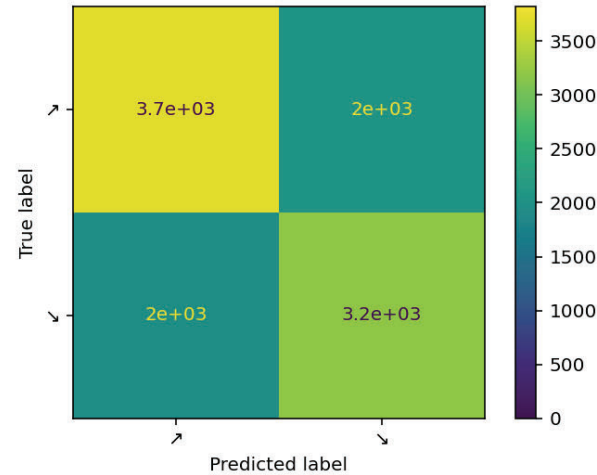


Accès aux données

prédiction à partir des données accumulées



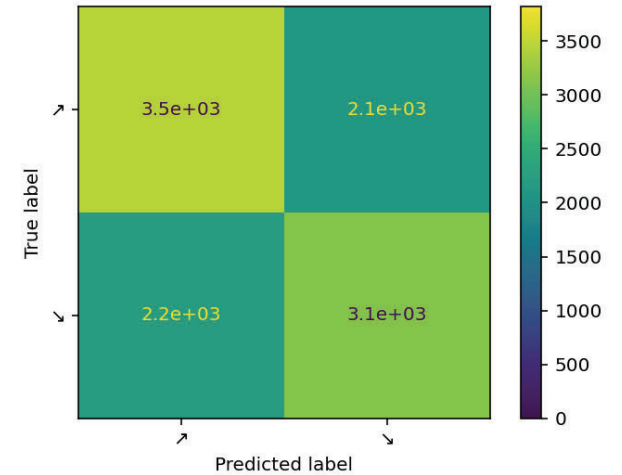
A, 10 modes, alpha = 0.01, tau = 7



0 500 1000

n=10, T=70

A, 10 modes, alpha = 0.01, tau = 14



Et maintenant : destruction créatrice ??

Mais y a-t-il encore des choses à découvrir en mathématiques ?

Et maintenant : destruction créatrice ??

Et maintenant : destruction créatrice ??

I.A.

Et maintenant : destruction créatrice ??

I.A.

Ordinateurs quantiques.

Et maintenant : destruction créatrice ??

I.A.

L'enjeu est de concevoir des algorithmes hybrides, inspirés par ces approches, avec des garanties (stabilité, erreurs, convergence, robustesse) et des critères opératoires permettant, une fois une méthode proposée, de savoir quoi modifier pour gagner en précision et mieux simuler le phénomène étudié

Ordinateurs quantiques.

Et maintenant : destruction créatrice ??

$$U(\mu) \simeq \alpha_1 U(\mu_1) + \alpha_2 U(\mu_2) + \cdots + \alpha_{10} U(\mu_{10})$$

I.A.

$$U(\mu) \simeq \alpha_1(\mu) U(\mu_1) + \alpha_2(\mu) U(\mu_2) + \cdots + \alpha_{10}(\mu) U(\mu_{10})$$

$$U(\mu) \simeq \alpha_1(\mu) U(\mu_1) + \alpha_2(\mu) U(\mu_2) + \cdots + \alpha_n(\mu) U(\mu_n) + \sum_{j=n+1}^N \hat{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}) U(\mu_j)$$

Ordinateurs quantiques.

Charbel Farhat

Albert Cohen et Augustin Somacal

Hassan Ballout, Christophe Prud'homme et Joubine Aghili

Et maintenant : destruction créatrice ??

$$U(\mu) \simeq \alpha_1 U(\mu_1) + \alpha_2 U(\mu_2) + \cdots + \alpha_{10} U(\mu_{10})$$

I.A.

$$U(\mu) \simeq \alpha_1(\mu) U(\mu_1) + \alpha_2(\mu) U(\mu_2) + \cdots + \alpha_{10}(\mu) U(\mu_{10})$$

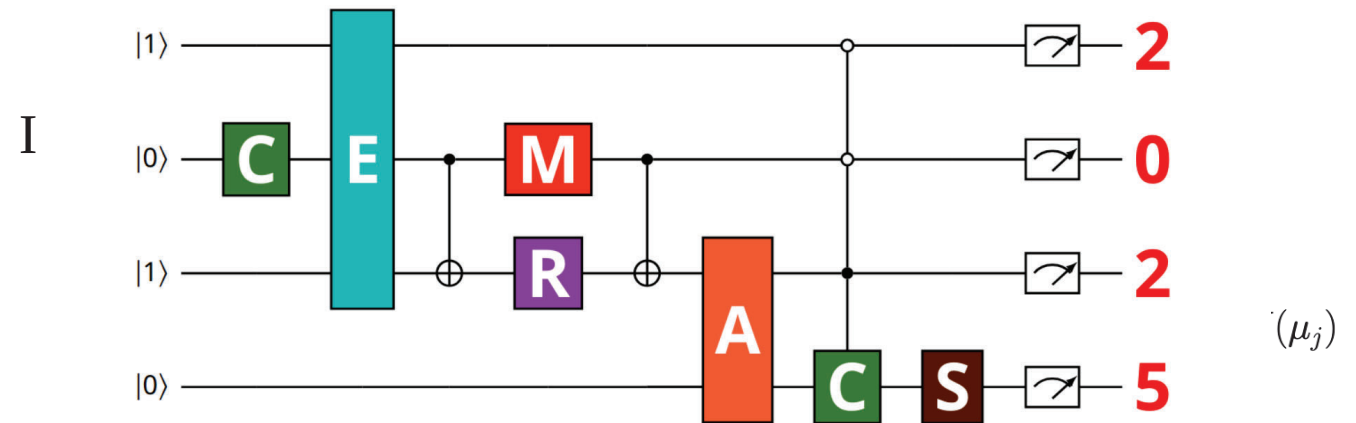
$$U(\mu) \simeq \alpha_1(\mu) U(\mu_1) + \alpha_2(\mu) U(\mu_2) + \cdots + \alpha_n(\mu) U(\mu_n) + \sum_{j=n+1}^N \hat{\alpha}(\boldsymbol{\alpha}) U(\mu_j)$$

estimations a posteriori

Ordinateurs quantiques.

Et maintenant : destruction créatrice ??

Quantum Computing



Ordinateurs quantiques.

Et maintenant : destruction créatrice ??

$$U(\mu) \simeq \alpha_1 U(\mu_1) + \alpha_2 U(\mu_2) + \cdots + \alpha_{10} U(\mu_{10})$$

I.A.

$$U(\mu) \simeq \alpha_1(\mu) U(\mu_1) + \alpha_2(\mu) U(\mu_2) + \cdots + \alpha_{10}(\mu) U(\mu_{10})$$

$$U(\mu) \simeq \alpha_1(\mu) \zeta_1 + \alpha_2(\mu) \zeta_2 + \cdots + \alpha_{10}(\mu) \zeta_{10} + \sum_{j=11}^N \hat{\alpha}_j(\boldsymbol{\alpha})(\mu) \zeta_j$$

Ordinateurs quantiques.

nouveaux outils qu'il faut apprendre à maîtriser

Pour conclure :

Travail en collaboration

Pour conclure :

Travail en collaboration

je ne suis que mathématicien !

Pour conclure :

Travail en collaboration

je ne suis que mathématicien !

prendre le temps de se retirer

Pour conclure :

Travail en collaboration

je ne suis que mathématicien !

prendre le temps de se retirer

donner des réponses adaptées — multicritère

Pour conclure :

Travail en collaboration

je ne suis que mathématicien !

prendre le temps de se retirer

donner des réponses adaptées — multicritère

importance des collaborateurs (ingénieurs compris)